

Master-Thesis

Entwicklung und Evaluation von Verfahren zum
Transfer kleiner Dies

von

B.Sc. Lukas Scheuble

Studiengang Mikromedizin

Prüfer

Prüfer Prof. Dr. Volker Bucher

Prüfer M.Sc. Andreas Heid

Thema:	
Entwicklung und Evaluation von Verfahren zum Transfer kleiner Dies	
Verfasser:	Lukas Scheuble
1. Prüfer:	Prof. Dr. Volker Bucher
2. Prüfer:	M.Sc. Andreas Heid
Semester:	Wintersemester 2016/2017
Kurzfassung:	
<p>Im Rahmen dieser Master-Thesis wurden Verfahren zum Transfer eines Arrays kleiner Dies (unverkapselte Chips) mit einer Kantenlänge von 250 μm bis 300 μm untersucht. Die Dies sollten hierbei von UV-lichtempfindlicher Folie selektiv abgehoben und auf einem Zielsubstrat abgesetzt werden. Als Verfahren wurde die Stempeltechnologie gewählt. Zum Aufnehmen der Dies wurden Stempel aus Silikon gegossen. Als Substrate zum Absetzen der Dies wurden Gläser mit Zucker beschichtet. Zur Überprüfung des Verfahrens wurden Zugversuche durchgeführt. Die senkrechte Abzugskraft der verwendeten Folie und der Silikonstempel wurde ermittelt. Durch Abzugstests der Folie im belichteten und unbelichteten Zustand wurden die genutzten Belichtungsprozesse überprüft. Das Umsetzen wurde mit gesägten Stücken eines Siliziumwafers durchgeführt. Es konnte nachgewiesen werden, dass das Umsetzen mit Silikonstempeln möglich ist und die erzeugten Kräfte hierfür ausreichen. Die Herstellung und Vorbereitung der gesägten Siliziumwürfel erwies sich hierbei als kritischer Prozess, was die Reproduzierbarkeit der Umsetzung stark beeinträchtigt.</p>	
Schlüsselwörter:	
Stempel, parallele Fertigung, Adhäsionskraft von Silikon, Sylgard 184	

Title:

Development and evaluation of transfer methods for small dies

Author: Lukas Scheuble

1. Examiner: Prof. Dr. Volker Bucher

2. Examiner: M.Sc. Andreas Heid

Semester: Winter semester 2016/2017

Abstract:

This master thesis discusses methods for the transfer of an array of small dies (chips without a housing) with an edge length of 250 μm to 300 μm . The dies should be selectively removed from UV-sensitive tape and placed on a target substrate. The chosen method was the transfer printing technology. To pick up the dies, stamps were made from silicon. As target substrate, glasses were coated with sugar. Tensile tests were carried out to check the process. The vertical pulling force of the film and the silicone stamp were measured. Peel-tests of the exposed and unexposed tape were made, to verify the exposure process. The transfer process was tested out with sawn pieces of a silicon wafer. It could be demonstrated, that the generated forces with silicone stamps are sufficient for the transfer process. The production and preparation of the sawn silicon cubes proved to be a critical process, which greatly impairs the reproducibility of the reaction.

Keywords:

transfer printing, parallel assembly, adhesion of silicone, Sylgard 184

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt habe.

Alle verwendeten Quellen (Literatur, Internet) sind im Literaturverzeichnis vollständig zitiert.

Reutlingen, den 22.03.2017

Adresse: Langenweg 11
 79761 Waldshut-Tiengen

Unterschrift:

Inhaltsverzeichnis

Formelverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 NEURO-FLEXARRAY	1
1.2 Zielsetzung	1
2 Grundlagen.....	4
2.1 Verfahren zum Umsetzen von kleinen Bauteilen.....	4
2.1.1 Serielles Umsetzen.....	4
2.1.2 Paralleles Umsetzen.....	4
2.2 Greifen von Mikrobauteilen	5
2.2.1 Vakuumgreifer	6
2.2.2 Mechanische Greifer.....	7
2.2.3 Stempel	8
2.3 Silikon.....	9
2.4 Zerteilen von Wafern	11
3 Materialien und Methoden	13
3.1 Dummy-Dies.....	13
3.1.1 UV-lichtempfindliche Klebefolie und deren Belichtung	13
3.1.2 Probenpräparation	16
3.2 Stempel	16
3.2.1 Silikon.....	17
3.2.2 Gussform.....	18

3.2.3	Herstellung der Silikonstempel	19
3.3	Zielsubstrat.....	21
3.4	Transfer von Dies	21
3.4.1	Fineplacer	21
3.4.2	Umsetzen der Dies	22
3.5	Zugversuche.....	23
3.5.1	Abzugskraft der Stempel	23
3.5.2	Abzugskraft von UV-empfindlicher Klebefolie	25
3.5.3	Ermittlung der Klebekraft von ADWILL D-841.....	26
4	Ergebnisse	29
4.1	Klebkraft von ADWILL D-841.....	29
4.2	Abzugsversuche von UV-empfindlicher Klebefolie.....	30
4.3	Abzugsversuche zur Haftung von Stempeln	32
4.4	Stempel	37
4.5	Silikonstempelverfahren	41
5	Zusammenfassung und Diskussion	43
5.1	Verfahren	43
5.2	Stempelherstellung.....	43
5.3	Stempeltechnologie	44
6	Fazit und Ausblick	49
7	Literaturangaben	50

Formelverzeichnis

Formel 1 Kraft durch Vakuumgreifer.	6
Formel 2 Zusammenhang von Spannung, Kraft und Fläche [vgl.12].	9
Formel 3 Aspektverhältnis.....	9
Formel 4 Berechnung der Belichtungszeit [vgl.22].	14
Formel 5 Belichtungszeit ADWILL D-841 Folie.	15
Formel 6 Maximale Aspektverhältnis bei Abzugsversuchen.	23
Formel 7 Minimalen Kontaktfläche für die Zugversuche mit Stempeln.	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Herstellerangaben zu ADWILL D-841 [21].	13
Tabelle 2 Aushärtezeiten von Sylgard 184 [25].	17
Tabelle 3 Schrumpfung von PDMS bei der Aushärtung in Abhängigkeit der Temperatur bei einem Mischungsverhältnis von 10:1 (base:curing agent) [26]. .	18
Tabelle 4 Größenangaben für Zugversuche bei Silikonstempeln.	24
Tabelle 5 Kräfte der Abzug der unbelichteten UV-empfindlichen Klebefolie.	29
Tabelle 6 Kräfte beim Abzug von Dummy-Dies mit einer Kantenlänge von 10 mm.	32
Tabelle 7 Kräfte beim Abzug von Stempeln.	35
Tabelle 8 Ergebnisse des Umsetzens.	42

Abkürzungsverzeichnis

PDMS	Polydimethylsiloxan
MEA	Mikroelektrodenarray
UV	Ultravioletter Wellenlängenbereich des Lichts
REM	Rasterelektrodenmikroskop
SMD	surface-mount device

1 Einleitung

Diese Master-Thesis beschäftigt sich mit dem Transfer von ungehäuteten Chips, welche auch Nacktchips oder Dies genannt werden. Es werden Aufnahmeverfahren für Arrays von Dies untersucht.

Kapitel 1.1 beschreibt das Projekt NEURO-FLEXARRAY, in dessen Rahmen die Thesis durchgeführt wurde. Die Zielsetzung der Thesis ist in Kapitel 1.2 erläutert.

1.1 NEURO-FLEXARRAY

Das Projekt „Großflächiges hochauflösendes Elektrodenarray für neuronale Anwendungen“ (kurz: NEURO-FLEXARRAY) verfolgt das Ziel ein großflächiges flexibles Elektrodenarray in Kombination mit einer hohen Elektrodendichte zu entwickeln. Das entwickelte Elektrodenarray soll die Lücke zwischen hochintegrierten Neurochips mit hoher Elektronendichte und großflächigen flexiblen Elektronenarrays mit geringer Ortsauflösung schließen. [Vgl. 1]

Um die Informationen der Vielzahl an Elektroden in hoher Qualität erfassen zu können, müssen die zellulären Signale vorverarbeitet werden. Durch zeitliches Multiplexing sollen mehrere Signale über eine einzelne Leitung übertragen werden. Diese Technologie soll es ermöglichen mit über 1000 Elektroden zu arbeiten. Um ein flexibles Elektrodenarray zu erhalten, werden kleine Chips mit definierten Abständen in eine Folie aus Parylen C eingebettet. Die Abstände zwischen den Chips sorgen für die erforderliche Biegsamkeit des Elektrodenarrays. Die Leitungszuführungen und die Anschlusskontaktierung werden auf der Folie hergestellt. Zum Schutz der Implantate in vivo, gegen Flüssigkeiten und Immunreaktionen, sollen die Chips mittels Atomlagenabscheidung metalloxydischer Schichten verkapselt werden.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Masterarbeit ist die Entwicklung und Evaluation eines Verfahrens zum selektiven Übertragen von Dies.

Die Herstellung der umzusetzenden Chips erfolgt in CMOS-Technologie auf 8 Zoll Siliziumwafern, welche nach dem Abschluss der Strukturierung in Dies zersägt

werden. Die Dies sollen dabei mit minimalen Abständen auf dem Wafer hergestellt werden, um die Fläche möglichst effizient auszunutzen. Das Rastermaß soll hierbei 300 μm betragen. Die Dies sollen im Foliensystem jedoch mit einem größeren Abstand platziert werden. Daher soll durch das selektive Umsetzen von Subgruppen aus mehreren Dies der Abstand benachbarter Dies vergrößert werden. Durch das vorgegebene Maß auf den Wafern, kann der Abstand durch selektives Umsetzen nur auf ein Vielfaches von 300 μm erhöht werden. Ziel ist ein Layout mit einem Rastermaß von 900 μm . Dies bedeutet, dass jeder dritte Die abgehoben wird. Nach dem selektiven Abheben soll diese Subgruppe auf einem anderen Substrat abgesetzt werden. Dies ist schematisch in Abbildung 1 für den Fall, dass jeder vierte Die einer Reihe bzw. Spalte übertragen wird, dargestellt.

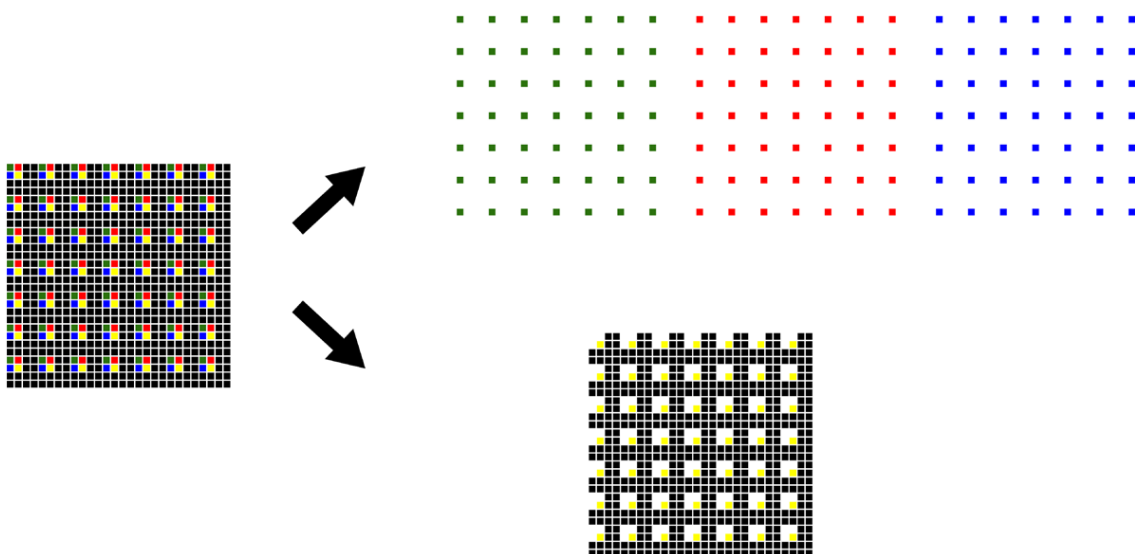


Abbildung 1 Schematische Darstellung der Übertragung von Subgruppen an Chips [2].

Während des gesamten Vorgangs dürfen sich die seitlichen Abstände zwischen den aufgenommenen Chips nicht ändern. Zudem dürfen die Chips weder kippen noch sich verdrehen. Dies ist entscheidend, um die Anschlüsse und Leiterbahnen, welche nach dem Umsetzen hinzugefügt werden, passgenau über Fotolithographie produzieren zu können. Für die Fotolithographie werden Masken genutzt, welche das gesamte Array abdecken. Sitzen die Chips nicht in der vorgegebenen Position, passen nicht alle Leiterbahnen auf die vorgesehenen Kontakte. Ein mögliches Layout für die Einbindung der Dies in das Neuro-Flexarray wird in Abbildung 2 gezeigt.

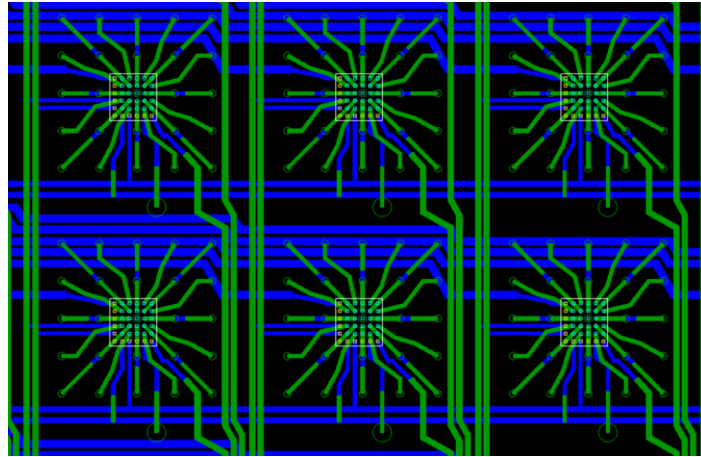


Abbildung 2 Ausschnitt aus einem Entwurf für das Layout des Arrays [2].

Es wurden bereits im Vorfeld viele Versuche zur Umsetzung der Dies durchgeführt. Die Eigenschaften des Elastomers Sylgard 184 für unterschiedliche Mischverhältnisse der beiden Komponenten wurden durch Zugversuche untersucht. Es wurden unterschiedliche Verfahren zur Herstellung von Silikonstempeln getestet. In den bisherigen Versuchen konnten nur vereinzelt selektiv Dies mit den Stempeln aufgenommen werden. Dabei wurden nie mehr als 10 % der zu übertragenden Dies aufgenommen. Es wurden noch keine Versuche zum Absetzen der an den Stempeln hafteten Dies unternommen.

Die Verfahren und Prozesse des Stempelverfahrens sollen systematisch analysiert und schrittweise überprüft werden. Dabei sollen insbesondere die Adhäsionskräfte, mit denen die Stempel an einem Siliziumwafer ziehen können, und die Haftkräfte der Sägefolie auf Stücken von Siliziumwafern ermittelt werden. Die bisherigen Versuche zum Umsetzen mit Silikonstempeln sollen fortgeführt werden, um mögliche Fehlerursachen zu ermitteln. Verbesserungen und Korrekturen des Prozesses sollen erprobt, theoretisch analysiert und dokumentiert werden.

Außerdem sollen alternative Verfahren zum Umsetzen der Chips recherchiert und auf ihre Anwendbarkeit hin überprüft werden.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen, welche für diese Masterthesis relevant sind. Hierzu gehören das Greifen von Mikrobauteilen, die Verfahren zum Umsetzen kleiner Bauteile, Silikon und das Zerteilen von Wafern.

2.1 Verfahren zum Umsetzen von kleinen Bauteilen

Das Umsetzen kleiner Bauteile oder das Bestücken von Leiterplatten mit SMD Bauteilen können in unterschiedlichen Abläufen durchgeführt werden. Diese werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

2.1.1 Serielles Umsetzen

Das serielle Umsetzen beschreibt das Umsetzen einzelner Bauteile. Hierbei kann man die Verfahren *Pick-and-Place* und *Collect-and-Place* unterscheiden. Bei *Pick-and-Place* wird jeweils ein einzelnes Bauteil gegriffen und anschließend abgesetzt. Beim *Collect-and-Place* Verfahren werden mehrere Bauteile einzeln aufgenommen und nacheinander an die gewünschte Position gesetzt. [vgl.3]

Weit verbreitet ist das automatisierte serielle Umsetzen von SMD-Bauteilen bei der Bestückung von Platinen. Die kleinsten zurzeit verfügbaren SMD-Bauteile haben ein 01005 Gehäuse mit einer Länge von 0,4 mm und einer Breite von 0,2 mm [vgl.4]. Moderne *Pick-and-Place* Bestückungsautomaten können diese Bauteile mit einer Genauigkeit bis $\pm 35 \mu\text{m}$ platzieren [vgl.5].

2.1.2 Paralleles Umsetzen

In Mikro- und Nanobauwerken wird häufig eine Vielzahl von Bauteilen gleichzeitig bearbeitet. Deshalb müssen beim Umsetzen von Bauteilen parallele Verfahren eingesetzt werden. Diese ermöglichen ein gleichzeitiges Umsetzen von vielen Bauteilen. Hierbei können deterministische und stochastische Verfahren unterschieden werden. [vgl.6]

Bei deterministischen Verfahren ist die Anordnung der Bauteile durch das abgebende Substrat vorgegeben. Es werden Verfahren wie das Umsetzen durch Stempelprozesse eingesetzt. Die Bauteile übernehmen hierbei die Rolle der Tinte beim

klassischen Stempeln. [vgl.6] Die strukturierten Bauteile werden auf einem Gebersubstrat vorbereitet. Ein Stempel nimmt selektiv die Struktur vom Gebersubstrat auf. Im Anschluss kann das Bauteil auf das Zielsubstrat abgesetzt werden. [vgl.7]

Bei Verfahren, welche nach dem stochastischen Prinzip konzipiert sind, nutzt man thermodynamische Prozesse zur Strukturierung. Zur Anwendung dieses Verfahrens werden auf dem Zielsubstrat Felder definiert, welche für die Bauteile ein günstiges Energieniveau bereithalten. Dieses kann zum Beispiel durch elektromagnetische Kräfte oder eine Höhendifferenz erzeugt werden. Die anzuordnenden Bauteile werden in einer sehr großen Anzahl über das Zielsubstrat bewegt, wobei mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit ein Bauteil die energetisch günstige Position erreicht und sich festsetzt. Die Bewegung der Bauteile kann durch Vibrationen oder den Einsatz von Flüssigkeiten erzeugt werden. [vgl.6]

2.2 Greifen von Mikrobauteilen

Bauteile können nach unterschiedlichen physikalischen Prinzipien durch Greifer aufgenommen werden. Das Greifen kann hierbei durch kraftschlüssige, stoffschlüssige oder formschlüssige Verbindungen erfolgen. Jedes Wirkprinzip kann in unterschiedlichen Verfahren umgesetzt werden. Im Bereich der kraftschlüssigen Verbindungen können Reibkräfte (z.B. Klemmen, Spannen), Unterdruckkräfte (z.B. Vakuumsauger), Magnetkräfte (Dauermagnete, Elektromagnete) oder elektrostatische Kräfte genutzt werden. Das Halten durch Stoffschluss wird durch Molekularkräfte ermöglicht. Beispiele hierfür sind Klebebänder und Kapillargreifer. Beim Halten durch Formschluss können Formelemente paarweise ein Objekt umschließen oder eine Oberflächenverhakung erzeugt werden. [vgl.8]

Das Greifen und Platzieren von Bauteilen im Mikrometerbereich stellt hierbei besondere Herausforderungen dar. Durch die kleinen Abmessungen der Bauteile nehmen auch die Anforderungen an die Präzision zu. Zudem verstärkt sich das Adhäsionsverhalten mit abnehmender Bauteilgröße. Dies geschieht durch die Änderung der Einflüsse von Gewicht- und Van-Der-Waals-Kräften. Der Einfluss der Gewichtskraft, welche volumenabhängig ist, nimmt mit der dritten Potenz ab, wohingegen die Van-Der-Waals-Kräfte nur mit der zweiten Potenz abnehmen, da sie

von der Oberfläche abhängen. Dies kann zur Folge haben, dass sich Bauteile nicht mehr vom Greifer lösen oder es durch Abstoßungskräfte zwischen Greifer und Bauteil zu Verschiebungen des Bauteils kommt. [vgl.8]

Durch die Abmessungen von Mikrobau teilen und die erschwerten Randbedingungen, schränken sich die anwendbaren Verfahren stark ein. Üblicherweise werden hierbei Vakuumgreifer oder mechanisch wirkende Greife eingesetzt [vgl.8]. Im Bereich der Mikro- und Nanofertigung werden als Transferverfahren auch Stempelprozesse eingesetzt [vgl.7].

2.2.1 Vakuumgreifer

Vakuumgreifer fixieren das Greifobjekt durch den Einsatz von Unterdruck. In der Praxis kann ein Vakuum bis etwa - 0,091 MPa genutzt werden. Bei dieser Technik sind keine beweglichen Teile zum Aufnehmen des Bauteils nötig, jedoch ist ein Einsatz in evakuierten Kammern nicht möglich. Entscheidend für das Erreichen des Drucks und der benötigten Haltekraft ist eine ausreichende Abdichtung zwischen Bauteil und dem Sauger. [vgl.8]

Das Prinzip des Vakuumgreifers ist in Abbildung 3 dargestellt.

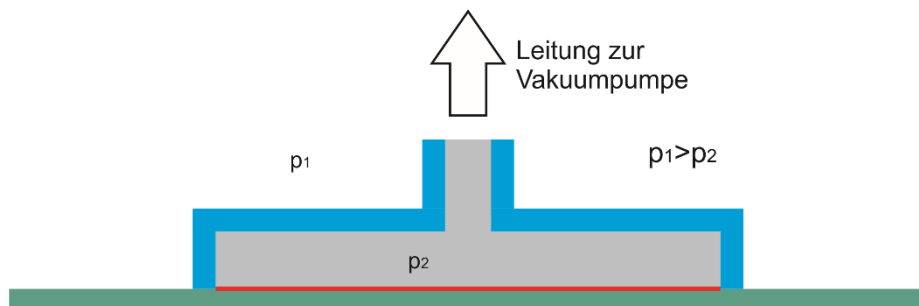


Abbildung 3 Schematische Darstellung eines Vakuumgreifers. Der Greifer (blau) greift das Bauteil (grün). Grau dargestellt ist der negative Druck. Die wirkende Fläche ist rot dargestellt.

Die maximale Kraft F_{vac} , mit welcher das Bauteil am Sauger gehalten wird, kann nach Formel 1 durch die wirksame Fläche A_{vac} und den negativen Druck p_{vac} berechnet werden. Hierbei werden der Sicherheitsfaktor und mögliche Fehlereinflüsse vernachlässigt.

Formel 1 Kraft durch Vakuumgreifer.

$$F_{vac} = A_{vak} \times p_{vak}$$

Für sehr kleine Bauteile werden als Sauger speziell spitz zulaufende Glaskapillare oder Düsenbauteile, wie Dosiernadeln, genutzt. [vgl.8] Die kleinsten kommerziell erhältlichen Dosiernadeln haben hierbei einen Außendurchmesser von etwa 0,3 mm und einen Innendurchmesser bis 0,15 mm [9 bis 11]. Mit den Dosiernadeln kann nach Formel 1 somit eine Kraft von 1,6 mN auf das Bauteil ausgeübt werden.

Für einen optimierten Vakuumgreifer, kann eine quadratische Fläche angenommen werden. Für die Dichtung muss auf jeder Seite Fläche mit einberechnet werden. Für einen quadratischen Die, mit einer Kantenlänge von 250 μm kann von einer wirkenden Fläche von 200 μm x 200 μm ausgegangen werden. Die maximal mögliche Kraft beträgt nach Formel 1 rund 3,6 mN.

2.2.2 Mechanische Greifer

Für mechanische Greifer zum Aufnehmen von Mikrobauteilen können unterschiedliche mechanische Modelle und Antriebe eingesetzt werden.

Die Kraftübertragung zwischen Aktor und Bauteil kann über vier mechanische Modelle realisiert werden. Es kann eine Parallelogramm-, Scheren-, Wipphebel-, oder Kniehebelkinematik eingesetzt werden. Diese werden in Abbildung 4 dargestellt. Die benötigten Gelenke werden meist als Festkörpergelenke realisiert. Hierbei hat das Biegeelement gegenüber der restlichen Struktur geringere Biegefestigkeit und wird bei der Bewegung des Gelenks verformt. Diese abriebfreie Bauform ermöglicht den Einsatz der Greifer für staubempfindliche Bauteile und in Reinräumen. [vgl.8]

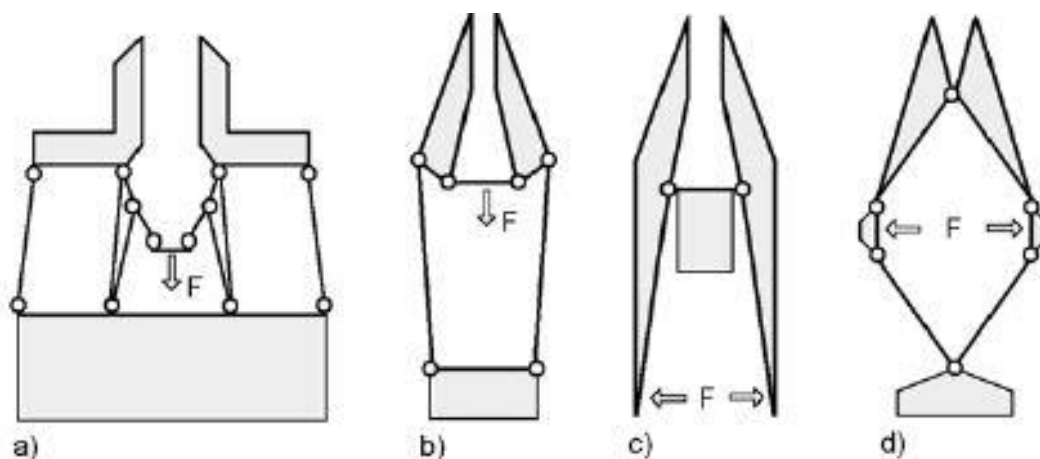


Abbildung 4 Mechanische Modelle von Mikrogreifern a) Parallelogrammkinematik, b) Scherenkinematik, c) Wipphebelkinematik, d) Kniehebelkinematik, F Antriebskraft [8].

Als Antrieb für Mikrogreifer können unterschiedliche Prinzipien zum Einsatz kommen. Es können zum Beispiel Formgedächtnisantriebe, piezoelektrische oder elektromagnetische Antriebe eingesetzt werden. [vgl.8]

Eine typische Konstruktion eines Klemmgreifers mit Scherenkinematik und Formgedächtnisantrieb zeigt Abbildung 5.

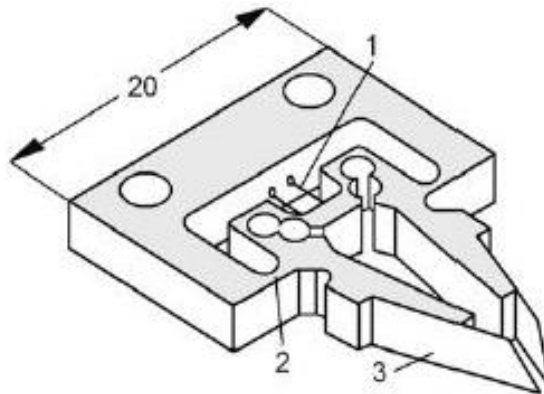


Abbildung 5 Mechanischer Mikrogreifer mit Aktor aus Formgedächtnislegierung; 1) Draht aus Formgedächtnislegierung; 2) elastisches Gelenk; 3) Greifbacke [8].

2.2.3 Stempel

Die Aufnahme von Bauteilen kann durch Adhäsionskräfte mit Stempeln realisiert werden. Hierbei wird ein Stempel auf ein Bauteil gedrückt, welches auf einem Gebersubstrat sitzt. Beim Abheben des Stempels haftet das Bauteil am Stempel. Soll das Bauteil wieder abgesetzt werden, wird dieses auf ein Zielsubstrat gedrückt. Beim Abheben des Stempels soll das Bauteil auf dem Zielsubstrat haften. Um dies zu ermöglichen, müssen die Kräfte, welche für das Trennen der zwei aneinanderhaftenden Stoffen benötigt werden, gut abgestimmt sein. Die auftretenden Kräfte werden durch die gewählten Materialien und Oberflächeneigenschaften der einzelnen Komponenten bestimmt. Während dem Umsetzen mit Stempeln treten drei relevante Grenzflächen auf, welche zwischen Bauteil und Grundsubstrat, Bauteil und Stempel sowie zwischen Bauteil und Zielsubstrat liegen. Um ein Abheben der Bauteile zu ermöglichen, muss die benötigte Kraft zum Trennen der Verbindung zwischen Bauteil und Grundsubstrat kleiner sein, als die Kraft zum Trennen von Bauteil und Stempel. Zum Absetzen muss wiederum die Verbindung zwischen Zielsubstrat und Bauteil stärker sein, als zwischen Bauteil und Stempel. [vgl.7]

Im Bereich der Stempeltechnologien werden die auftretenden Kräfte häufig auf die Fläche bezogen und als Spannung in Megapascal (MPa) angegeben. Der Zusammenhang zwischen Spannung σ , Kraft F und Fläche A wird in Formel 2 gezeigt.

Formel 2 Zusammenhang von Spannung, Kraft und Fläche [vgl. 12].

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Die möglichen Spannungen sind abhängig vom Aspektverhältnis der Stempelfüßchen und der Anpressspannung mit welcher der Stempel auf die Probe gedrückt wurde. Das Aspektverhältnis Ar beschreibt das Verhältnis von Höhe H zu Breite B [vgl.13].

Formel 3 Aspektverhältnis

$$Ar = \frac{H}{B}$$

Die größten Abzugsspannungen können bei flachem Silikon gemessen werden. Sie liegen unabhängig von der Anpressspannung im Bereich von 0,03 MPa bis 0,035 MPa bei einer Abzugsgeschwindigkeit von 0,6 mm/min. Der Einfluss der Anpressspannung nimmt mit einem zunehmenden Aspektverhältnis zu. Die größten Abzugsspannungen können bei einem Aspektverhältnis von mehr als 1,4 bei einer Anpressspannung von 0,8 MPa gemessen werden. [vgl.13]

Die Geschwindigkeit, mit welcher das Silikon vom Untergrund abgezogen wird, hat hierbei einen bedeutenden Einfluss auf die Abzugskraft. Die Kraft, welche benötigt wird, um das Silikon vom Untergrund zu trennen, steigt mit zunehmender Geschwindigkeit. [vgl.14]

2.3 Silikon

Silikon oder auch Polysiloxane werden Makromoleküle genannt, deren Grundstruktur aus Silizium- und Sauerstoffatomen besteht. An die Siliziumatome sind typischerweise Methylgruppen ($-\text{CH}_3$) gebunden. Hierbei binden an die mittig liegenden Siliziumatome zwei Methylgruppen und Siliziumatome am Kettenende drei Methylgruppen. Die Anzahl der Kettenglieder kann von einigen wenigen bis zu mehreren tausend reichen. [vgl.15] Das Silikon gehört zu den siliziumorganischen Verbindungen [vgl.16].

Die beschriebene Struktur wird in Abbildung 6 dargestellt.

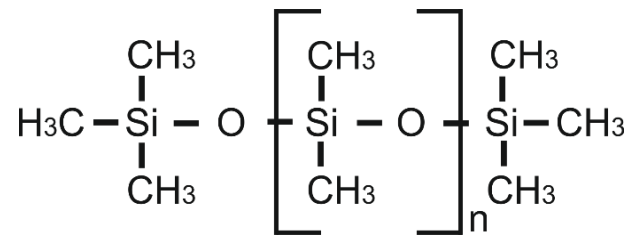


Abbildung 6 Strukturformel Polydimethylsiloxan (PDMS) [vgl. 17].

Silikon kann üblicherweise in unterschiedlichen Zuständen von hochviskos bis fest vorliegen. Abhängig vom Zustand unterscheidet man Silikonöl, Silikongel und Silikonelastomere. Silikonöl besteht aus kurzen linearen Ketten und ist flüssig. Es wird als Füll- und Schmiermittel sowie in hochreiner Form in der Pharmazie und Medizintechnik verwendet. Im Silikongel ist eine Matrix aus dreidimensional verknüpften Ketten vorhanden, welche mit Silikonöl aufgefüllt ist. Durch die hohe Viskosität wird es hauptsächlich als Füllmaterial eingesetzt. Liegt Silikon mit einer hochvernetzten Struktur vor, nennt man es Silikonelastomer. [vgl.15]

Um Silikonkautschuk in Silikonelastomer umwandeln zu können, sind Vernetzungsprozesse nötig. Bei der Vernetzung können drei Hauptprozesse unterschieden werden: Die Kondensationsvernetzung, die Peroxidvernetzung und die Additionsvernetzung. Da das verwendete Silikon (Dow Corning Sylgard 184) ein additionsvernetzendes Silikon ist, wird lediglich diese Vernetzung weiter beschrieben.

Bei der Additionsvernetzung wird eine Silangruppe (Si-H) und eine organofunktionelle Gruppe mit einer Doppelbindung, meist eine Vinylgruppe (Si-CH=CH₂), kombiniert. Um diese Vernetzung zu ermöglichen, muss das PDMS modifiziert werden, damit es die benötigten Gruppen enthält. Die eigentliche Vernetzung läuft unter der Anwesenheit eines Katalysators, meist eine Platinverbindung, ab. Abhängig vom Katalysator verläuft die Additionsreaktion bei Raumtemperatur oder nur bei erhöhter Temperatur ab. Meist werden 2-Komponentensysteme eingesetzt wobei der Katalysator über eine Komponente hinzugefügt wird. Der Härtingsprozess beginnt somit erst beim Mischen der Komponenten. [16, 18] Ein Beispiel für eine Additionsreaktion ist in Abbildung 7 gezeigt.

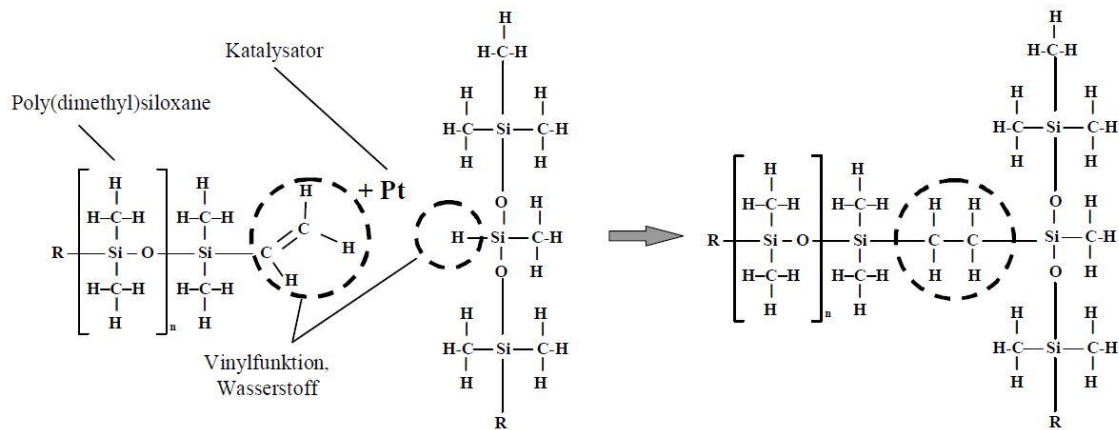


Abbildung 7 Additionsreaktion von PDMS [16].

Die Nutzung von additionsvernetzenden Silikonen bietet viele Vorteile. Die Vernetzung kann bei Raumtemperatur schnell ablaufen und eine Erhöhung der Temperatur ist nicht zwingend notwendig. Es entstehen keine Spaltprodukte, welche austreten können und die Schrumpfung während der Aushärtung ist minimiert. Zudem vergilbt es während der Aushärtung nicht und die Oberfläche wird trockener als bei anderen Härtingsprozessen. [16, 18]

2.4 Zerteilen von Wafern

Die Herstellung von Komponenten der Mikrosystemtechnik erfolgt meist auf Wafern. Hierbei wird parallel eine Vielzahl von Strukturen in einem Waferverbund gefertigt, welcher im Anschluss getrennt wird. Das gängigste Verfahren hierzu ist derzeit das Wafersägen, bei dem ein rotierendes, mit Diamantsplittern besetztes Sägeblatt den Wafer in einem Schleifprozess zerteilt. Da hierbei Material verloren geht, muss bereits beim Design ein Abstand von mindestens 15 µm zwischen den Dies als Trennrahmen vorgesehen werden. Da der Trennrahmen beim Vereinzeln zerstört wird, ist das Ziel, eine möglichst dünne Sägespur zu erzeugen. Um die Dies während und nach dem Trennen zu fixieren, wird der Wafer auf eine klebende Folie (dicing tape), üblicherweise Blaufolie, aufgebracht. [vgl.19]

Bei der Fixierung mit Blaufolie sollte die Klebekraft auf die Größe der Dies angepasst sein. Die Klebekraft muss hoch genug sein, um die Dies beim Sägen sicher zu fixieren, und gering genug, um die Dies nach der Vereinzlung beschädigungsfrei abheben zu können. Eine Alternative zur Blaufolie bieten hierbei Sägefolien, welche ihre Klebkraft durch die Belichtung mit ultraviolettem (UV) Licht verlieren. Diese Folien haben im unbelichteten Zustand eine sehr hohe Haftung und fixieren

kleinste Dies sicher. Wird die Folie mit UV-Strahlung belichtet, nimmt die Klebekraft deutlich ab. Dies ermöglicht es, Dies stress- und bruchfrei abzuheben. [vgl.20]

3 Materialien und Methoden

In diesem Kapitel werden die genutzten Materialien, Geräte und Methoden erläutert.

3.1 Dummy-Dies

Da sich die originalen Chips noch in der Entwicklungsphase befinden und zum Zeitpunkt der Durchführung der Master-Thesis noch nicht zur Verfügung standen, werden Dummys-Dies eingesetzt. Für diese Dummys-Dies werden beidseitig polierte Wafer genutzt. Diese lassen sich entsprechend der strukturierten Wafer sägen und die Oberfläche ist den endgültigen Chips sehr ähnlich. Die Dummys-Dies ermöglichen so kostengünstige und realitätsnahe Entwicklungsversuche für das Umsetzen der Dies.

3.1.1 UV-lichtempfindliche Klebefolie und deren Belichtung

Zur Vorbereitung der Dummy-Dies wurde das benötigte Stück eines Wafers ($3\text{ cm}^2 - 4\text{ cm}^2$) auf eine UV-lichtempfindliche Klebefolie blasenfrei aufgebracht. Dies ermöglichte die Fixierung des Wafers in der Wafersäge und fixierte die einzelnen Dummy-Dies bis zum Abheben. Hierbei wird das Sägeklebeband ADWILL D-841 (LINTEC Advanced Technologies GmbH, München) eingesetzt. Dieses verliert bei der Belichtung mit UV-Strahlung einen Großteil seiner Klebkraft. Die Herstellerangaben für ADWILL D-841 sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 Herstellerangaben zu ADWILL D-841 [21].

Klebkraft unbelichtet (polierter Si-Wafer)	25.000 mN/25 mm
Klebkraft belichtet (polierter Si-Wafer)	50 mN/25 mm
<u>Belichtungsbedingungen</u>	
Strahlungsintensität	230 mW/cm ²
Strahlendosis	190 mJ/cm ²
Wellenlänge	365 nm
<u>Bedingungen Abzugsversuche</u>	
Abzugsgeschwindigkeit	300 mm/min
Abzugswinkel	180°

Um die Proben vor vorzeitiger Belichtung durch UV-Strahlung in den Laborräumen zu schützen, wurde das Aufkleben der Wafer in Reinräumen mit Gelblicht durchgeführt. Zum Schutz der Proben während dem Transport und der Lagerung wurden die genutzten Gefäße in Alufolie eingewickelt.

Die Belichtungsbedingungen können den Herstellerangaben der Folie (Tabelle 1) entnommen werden. Mit der Intensität I (mW/cm²) des genutzten UV-Strahlers und der benötigten Strahlendosis D (mJ/cm²) welche vom Hersteller der Folie angegeben wird, kann die benötigte Belichtungszeit t (s) nach Formel 4 berechnet werden.

Formel 4 Berechnung der Belichtungszeit [vgl.22].

$$t = \frac{D}{I}$$

Die Intensität des Strahlers ist hierbei abhängig vom Abstand zwischen Lampe und Substrat, Art des Substrats, dem Lampenreflektor und dem Alter der Lampe. [vgl.22] Aufgrund dieser Variablen, empfiehlt sich die Berechnung der Belichtungsdauer aus gemessenen Intensitäten.

Als Standardlampe für die Belichtung wurde eine UV-Lampe vom Typ DELOLUX 03E (DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co., Windach) genutzt. Zum Schutz der Umgebung ist die verwendete Lampe über einer Abschirmung aus Stahlblechen montiert. Um ein Überhitzen der Lampe oder der Proben innerhalb der Abschirmung zu verhindern, ist ein Lüfter verbaut, welcher kontinuierlich Raumluft zur Kühlung in die Abschirmkammer bläst.

Die Probe wird zusätzlich in einer speziellen Belichtungskammer mit kontinuierlichem Stickstofffluss belichtet. Dies bietet eine zusätzliche Kühlung der Probe und verhindert die Bildung von Ozon, welches zu einer Filterung der UV-Strahlung führt [vgl.20]. Das UV-Licht tritt durch eine UV-durchlässige Scheibe in die Kammer ein. Die Durchlässigkeit der Scheibe im UVA-Bereich wurde mit einem UV-Meter der Firma Hönle bestimmt und beträgt ca. 85 %. Die Belichtungskammer ist in Abbildung 8 dargestellt.

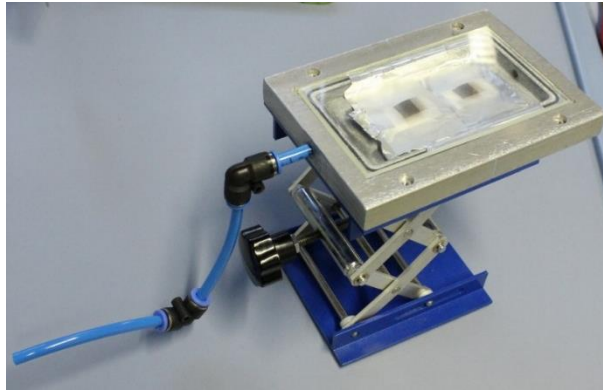


Abbildung 8 Belichtungskammer mit Gasanschluss auf einem Laborboy.

Laut Herstellerangabe liefert die Lampe eine UVA-Intensität von 55 mW/cm^2 bei einem Abstand von 10 cm [vgl.23]. Die gemessene Intensität I_D auf dem Boden der Belichtungskammer I_M , mit Abdeckung durch die Scheibe der Stickstoffkammer betrug $\approx 28 \text{ mW/cm}^2$. Die genutzte Lampe wurde bereits viele Stunden mit einer Vielzahl von Einschaltvorgängen betreiben, was zu einer verminderten Intensität führt. [vgl.23] Um bei den Belichtungsvorgängen für die Folie die maximale Intensität zu erreichen, wird die Belichtungskammer mit einem minimalen Abstand zur Lampe platziert. Die Belichtungskammer wird hierzu auf einem höhenverstellbaren Labortisch platziert, welcher in Abbildung 8 zu sehen ist.

Nach Formel 4 kann die Belichtungszeit für die ADWILL D-841 Folie t_{DL} (Formel 5) durch eine DELOLUX 03E berechnet werden.

Formel 5 Belichtungszeit ADWILL D-841 Folie.

$$t_{DL} = \frac{D_A}{I_D} = \frac{190 \frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}}{38 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}} = 5 \text{ s}$$

Die praktische Belichtungsdauer, welche benötigt wird, übersteigt den theoretischen Wert um ein Vielfaches. Für ein gutes Belichtungsergebnis wird bei diesem Aufbau eine Belichtungszeit von 10 min benötigt. Diese massive Abweichung wird durch mehrere Faktoren bedingt. Einerseits ist die Intensität der verwendeten Lampe deutlich geringer als die Angabe des Herstellers. Dies kann die Belichtungsreaktion verlangsamen. Des Weiteren konnte nur der gesamte UVA-Bereich der Lampe gemessen werden. Der Anteil der relevanten Strahlung um 365 nm bei der Intensitätsmessung ist somit unklar.

3.1.2 Probenpräparation

Mit einem Sägeblatt Disco Z09-SD3000-Y1-60 (DISCO HI-TEC EUROPE GmbH, München) wurden die Wafer in einer Wafersäge vom Typ Disco DAD 321 (DISCO HI-TEC EUROPE GmbH, München) voneinander getrennt. Der Sägeschnitt wurde so tief gewählt, dass komplett durch den Wafer bis in das Tape hinein gesägt wurde. Ziel ist es, die Chips auf eine Größe von 250 μm mit einer 50 μm breiten Sägespur zu trennen. Um im Entwicklungsprozess die selektive Abnahme zu erleichtern, wurden die Dummy-Dies mit einer breiten Sägespur von 200 μm und einer Chipgröße von 300 μm hergestellt.

Nachdem die gesägten Proben belichtet wurden, muss das Tape auf einem festen Untergrund fixiert werden. Dies ist notwendig, um ein Fixieren der Folie im Fine-placer zu ermöglichen. Die Stabilisierung erfolgte durch einen Objektträger für die Mikroskopie, auf welchen die Folie mit doppelseitigem Klebeband geklebt wurde. Beim Aufkleben ist auf blasenfreies Aufbringen zu achten, da ein nachträgliches Andrücken oder Entfernen von Blasen nicht möglich ist. Vor dem Aufkleben der Folie muss die Verbindung zwischen den Dummy-Dies und der Folie mechanisch vorbelastet werden. Hierzu wird die Folie in zwei Orientierungen über eine 90° Ecke mit einem Radius von 3 mm gezogen. Dies löst die Dumm-Dies an, um ein problemloses Abheben zu ermöglichen. Die fertig vorbereitete Probe ist in Abbildung 9 dargestellt.



Abbildung 9 Präparierte Probe BL3-1612-4 nach Abheben von zwei Arrays an Dies.

3.2 Stempel

Zum Abheben der Dies werden Silikonstempel gefertigt. Dies erfolgte durch Gießen eines Silikonelastomers in eine Stempelform.

3.2.1 Silikon

Für die Herstellung der Stempel wurde das farblose und transparente Silikonelastomer Sylgard 184 (Dow Corning GmbH Wiesbaden, Wiesbaden) verwendet. Sylgard 184 wird aus einer Grundmasse (base) und einem Härter (curing agent) gemischt. Das Mischen erfolgt nach Gewichtsanteilen, wobei das Verhältnis von 10:1 (base:curing agent) als Standard angegeben wird [vgl.24]. Um sicherzustellen, dass beide Komponenten gleichmäßig vermengt werden, wurde dies in einem Speedmixer für zwei Minuten bei 2000 rpm durchgeführt. Nach dem Mischen der Komponenten muss das Silikon innerhalb von 90 min verarbeitet werden. Die vollständige Aushärtung kann bei Raumtemperatur oder bei erhöhter Temperatur im Ofen erfolgen [vgl.25]. Die Dauer der Aushärtung bei unterschiedlichen Temperaturen wird in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2 Aushärtezeiten von Sylgard 184 [25].

Temperatur bei der Aushärtung	Dauer der Aushärtung
25 °C	48 h
100 °C	35 min
125 °C	20 min
150 °C	10 min

Je nach Aushärtetemperatur können unterschiedlich starke Schrumpfungen des Silikons auftreten. Die Schrumpfung fällt dabei mit höherer Temperatur zunehmend stärker aus. Bei Raumtemperatur kann das Silikon annähernd ohne Schrumpfung ausgehärtet werden. Wird die Aushärtung bei erhöhter Temperatur durchgeführt, muss die Gussform an die Schrumpfung angepasst werden. [Vgl.26] Die prozentuale Schrumpfung bei Aushärtung wird in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3 Schrumpfung von PDMS bei der Aushärtung in Abhängigkeit der Temperatur bei einem Mischungsverhältnis von 10:1 (base:curing agent) [26].

Temperatur bei der Aushärtung	Schrumpfung in %
8 °C	- 0,75 ± 0,14
21 °C	- 0,13 ± 0,05
40 °C	1,07 ± 0,05
60 °C	1,67 ± 0,06
70 °C	1,73 ± 0,04
80 °C	1,92 ± 0,03
100 °C	2,28 ± 0,04
120 °C	2,70 ± 0,05

3.2.2 Gussform

Als Gussform wurde ein ausgeschnittenes Blech aus nichtrostendem Stahl (X5CrNi18-10) mit einer Dicke von 100 µm eingesetzt. Zum Ausschneiden der Stempelform wird ein Protolaser U (LPKF Laser & Electronics AG, Garbsen) genutzt. Nach dem Ausschneiden der Form lösten sich die Metallreste aus den ausgeschnittenen Öffnungen. Reste, welche nicht von alleine herausfielen, mussten mit einer Nadel herausgestochen werden. Durch die Temperatureinwirkung während des Schneidens entstand leichter Rost an den Schnittkanten. Dieser wird durch ein Bad in 10 prozentiger Phosphorsäure entfernt.

Die neu erstellten Gussformen haben ein einheitliches Layout. Dieses besteht aus einer quadratischen Außenform von 35 mm x 35 mm. Die Ecken wurden mit einem Radius von 3 mm abgerundet. Zusätzlich wird jede Stempelform mit einer Beschriftung versehen, um Verwechslungen zu vermeiden und eine schnelle Identifizierung zu ermöglichen. Eine Stempelform mit diesem Layout zeigt Abbildung 10.

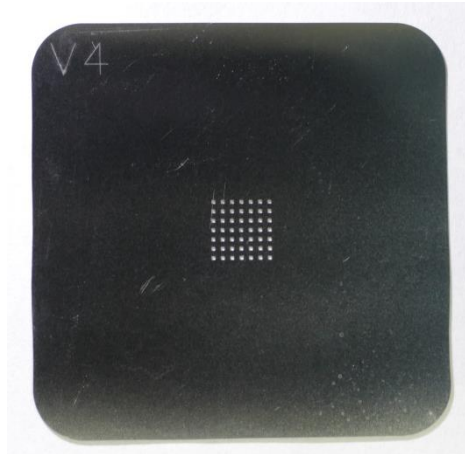


Abbildung 10 Stempelform V4 mit neuem Layout.

3.2.3 Herstellung der Silikonstempel

Bevor das Gießen erfolgen kann, sind mehrere vorbereitende Schritte nötig.

Als Deckglas um den Stempeln Stabilität zu verleihen wurde Standard-Objektträger (Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe) aus Kalk-Natron-Glas eingesetzt. Diese haben eine Größe von 76 mm x 26 mm und eine Dicke von 1 mm. Da für die Stempelherstellung kleine Gläser benötigt werden, wurden quadratische Stücke mit 26 mm Kantenlänge zurechtgeschnitten. Anschließend erfolgt eine Reinigung der Gläser mit Isopropanol, destilliertem Wasser und einer Trocknung durch Abblasen mit Stickstoff. Die gereinigten Gläser wurden mit Plasma vorbehandelt, um eine gute Benetzung und dauerhafte Bindung des Silikons zu erzeugen. Dies erfolgt durch eine Behandlung mit Atmosphärenplasma für 90 s in einem Plasma-cleaner 4 (ILMVAC GmbH, Ilmenau).

Die Stempelformen müssen vor der Verwendung ebenfalls gereinigt werden. Bei der Wiederverwendung von genutzten Stempelformen ist zu beachten, dass vor der Reinigung mögliche Silikonreste unter Zuhilfenahme von Ethanol vorsichtig abzureiben sind. Die Reinigung erfolgte mit Isopropanol, destilliertem Wasser und einer Trocknung durch Abblasen mit Stickstoff.

Zum Gießen der Stempel wurden bis zu drei Stempelformen in eine quadratische Petrischale aus Polystyrol gelegt. Hierbei ist zu beachten, dass ein Abstand von 4 cm – 5 cm eingehalten wird. Dies ist notwendig, da die Magnete, welche im weiteren Prozess zur Befestigung genutzt werden, sonst zu einer Verschiebung der Stempel führen können. Die Petrischalen sollten nicht wiederverwendet werden,

da beim Herauslösen die Oberfläche beschädigt wird und dies zu fehlerhaften Abformungen führt. Das Silikon wurde tropfenweise mit einer Spritze auf die Öffnungen der Stempelform aufgebracht. Alle Öffnungen sollten vom Silikon gut ausgefüllt sein. Es sollte jedoch nicht zu dick aufgebracht werden. Während des Aufbringens und dem Verteilen wurden sichtbare, größere Luftblasen aus dem Bereich der Öffnungen geschoben. Nach dem Aufbringen des Silikons musste die Probe für 15 bis 20 Minuten in einem Exsikkator gestellt werden, um das Silikon setzen zu lassen und die Anzahl der Luftblasen zu minimieren. Nach der Entnahme der Petrischale wurde diese auf ein magnetisches Blech gestellt. Die Deckgläser wurden mit der plasmabehandelten Seite vorsichtig auf die gefüllten Öffnungen der Stempelform gelegt. Hierbei wurde zuerst eine Kante aufgesetzt und das Glas langsam abgelassen. Sichtbare Luftblasen konnten bei diesem Schritt durch vorsichtiges Drücken und Bewegen des Glases aus dem Bereich der Stempelfüße entfernt werden. Zum Aushärten wurde jeder Stempel mit einem Magneten fixiert. Dies sorgt für eine gleichmäßige Anpresskraft zwischen Stempelform und Deckglas.

Nach dem Ende der Trocknungszeit wurden die Magnete abgehoben. Das herausgedrückte Silikon wird um die Stempelform herum eingeschnitten und der Stempel aus der Petrischale gelöst. Zur Lagerung wird der Stempel mit der Glasseite nach unten in eine saubere Petrischale gelegt und zum Schutz vor Staub abgedeckt.

Abbildung 11 zeigt einen Stempel der Form der Stempelfüßchen nach Vorlage V1 (Array 7 x 7; Füßchen 350 µm x 350 µm; Rastermaß 1000 µm)

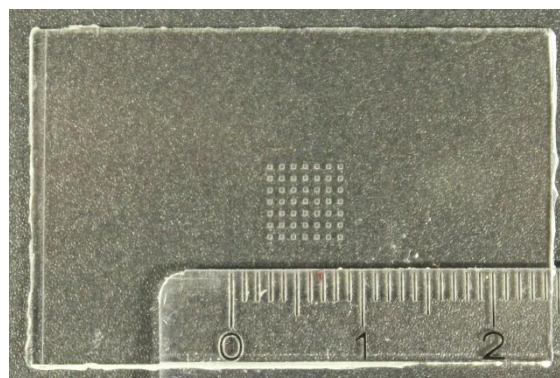


Abbildung 11 Stempel der Form V1.

3.3 Zielsubstrat

Nach der selektiven Aufnahme der Dummy-Dies mit einem Stempel von einer Probe, müssen die Dies auf einem geeigneten Zielsubstrat abgesetzt werden. Während der Versuchsphase wurden hierfür Gläser genutzt, welche mit einer Zuckperlösung beschichtet wurden.

Die Herstellung erfolgte mit einer Lösung aus Haushaltszucker, welcher in destilliertem Wasser im Verhältnis 1:1 gelöst wurde. Die Lösung wurde mittels Rotationsbeschichtung (90 s bei 1000 U/min) auf das Glas aufgebracht und anschließend getrocknet. Das Trocknen erfolgt in einem Ofen bei 100 °C für 5 min. Der Zucker wird als Opferschicht zur Fixierung der Dummy-Dies genutzt. Im weiteren Verlauf der Einbettung wird der Zucker vollständig in Wasser aufgelöst, um die Probe vom Glas zu trennen. Vor dem Absetzen der Dies musste die Zuckerschicht einer erhöhten Luftfeuchtigkeit ausgesetzt werden, um eine ausreichend klebrige Oberfläche zu erhalten.

3.4 Transfer von Dies

Der Hauptschritt des Transfers ist das eigentliche Abheben der Dummy-Dies aus dem gesägten Wafer und das Absetzen auf dem Zielsubstrat. Hierzu wurde ein FINEPLACER® Lambda (Finetech GmbH & Co. KG, Berlin) verwendet.

3.4.1 Fineplacer

Um die Chips und die Stempel exakt positionieren und die Dies definiert abheben zu können, wird ein Fineplacer genutzt. Der Fineplacer ermöglicht das präzise Ausrichten von Bauteilen zueinander. Hierzu wird, unter Verwendung eines feststehenden Strahlteilers, ein Bild des Bauteils und des Substrats überlagert [vgl.27]. Die zwei Komponenten lassen sich durch Verschieben des Probenhalters und drehen der Aufnahme für Bauteile mit der Hilfe von Mikrometerschrauben genau platzieren. Die Aufnahme für Bauteile kann über einen Hebel abgelassen werden. Durch diesen Vorgang wird das Bauteil auf die zuvor ausgerichtete Position der Probe gedrückt. Die hierbei wirkende Anpresskraft kann zwischen 1 N und 10 N eingestellt werden. Die Funktionsweise wird in Abbildung 12 visualisiert.

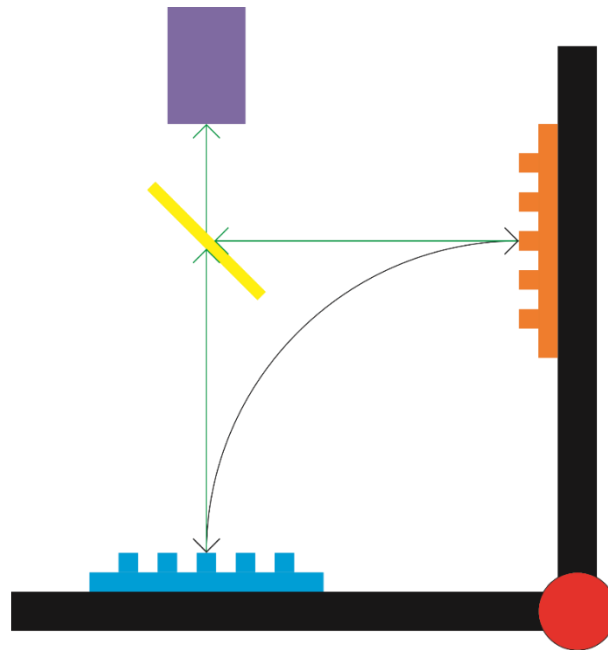


Abbildung 12 Schematische Darstellung des Fineplacers. Ein Strahlteiler (gelb) überlagert die Strahlengänge vom Bauteil (orange) und von der Probe (blau) kommend, sodass die Kamera (lila) die überlagerten Bilder aufnehmen kann. Die Probe kann dann Mikrometer genau verschoben und das Bauteil rotiert werden. Durch Absenken des Bauteils kommen Bauteil und Probe so aufeinander zu liegen, wie sie zuvor mit Hilfe der Bildüberlagerung ausgerichtet wurden.

3.4.2 Umsetzen der Dies

Zum Umsetzen der Dies wurden der Stempel und der Objektträger mit der aufgeklebten Probe im Fineplacer fixiert. Die Kamerabilder der Ausrichtung werden in Abbildung 13 gezeigt.

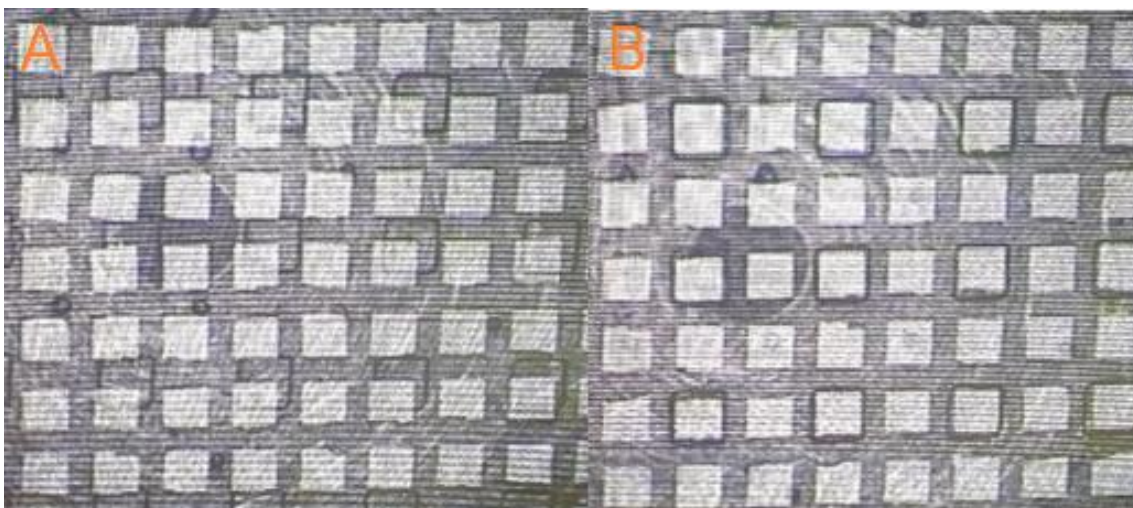


Abbildung 13 Ausrichten eines Stempels auf einer Probe im Fineplacer. Die Dummy-Dies werden als helle Quadrate dargestellt. Von den Stempelfüßen werden lediglich die Randbereiche als schwarzer Umriss dargestellt. A zeigt den nicht ausgerichteten Stempel nach der Fixierung der Proben. B zeigt den ausgerichteten Stempel, bereit zum Aufnehmen der Dummy-Dies.

Nach dem Ablassen des Stempels wurde eine Haltezeit von 20 s abgewartet, bevor der Stempel mit den Dies abgehoben wurde. Die Zeit ist notwendig, damit sich die weiche Silikonoberfläche vollständig an die Oberfläche der Dies anschmiegen kann und mögliche Luftblasen entweichen können. Um die Komponenten planparallel zu halten, wurde nach der Haltezeit die Probe mit der Z-Höhenverstellung des Probentellers vom Stempel gelöst. Erst nach dem Trennen wurde der Stempel in die Ausgangsposition zurückgeklappt. Über das Kamerasystem kann eine optische Kontrolle erfolgen, ob und wie viele Dummy-Dies von der Probe abgehoben wurden.

Zum Absetzen wurde ein Zuckersubstrat auf dem Probenteller fixiert. Der Stempel konnte an der gewünschten Position abgelassen werden. Die Herstellung des Kontakts zwischen Probe und Stempel erfolgt über die Z-Höhenverstellung des Probentellers. Hierbei war eine minimale Kontaktzeit ausreichend, um alle Dummy-Dies abzusetzen.

3.5 Zugversuche

Zur Charakterisierung der Kräfte während des Abhebens und zur Überprüfung der Belichtung wurden verschiedene Zugversuche durchgeführt, welche in den folgenden Unterkapiteln beschrieben werden.

Die Zugversuche wurden mit einer Zug- & Druckprüfmaschine vom Typ Z020 (Zwick GmbH & Co. KG, Ulm) durchgeführt.

3.5.1 Abzugskraft der Stempel

Zur Ermittlung der Kräfte, mit welchen Silikonstempeln an einem polierten Silicium Wafer ziehen kann, wurden Zugversuche durchgeführt. Hierzu wurde der Stempel planparallel auf einen Wafer gedrückt und nach einer definierten Haltezeit wieder abgezogen.

Bei den Stempeln für das Umsetzen der Dummy-Dies betrug die Höhe der Stempelfüße H_s 100 μm und die minimale Breite B_{\min} 250 μm . Das maximale Aspektverhältnis Ar_{\min} kann nach Formel 3 berechnet werden.

Formel 6 Maximale Aspektverhältnis bei Abzugsversuchen.

$$Ar_{\max} = \frac{H_s}{B_{\min}} = \frac{100 \mu\text{m}}{250 \mu\text{m}} = 0,4$$

Durch die geringe Höhe der Stempelfüße ist das Aspektverhältnis mit Werten bis 0,4 der Stempelfüße sehr klein. Bei diesen kleinen Aspektverhältnissen hat die Vorspannung nahezu keine Auswirkung auf die Anzugskraft. Um mögliche Auswirkungen zu eliminieren wird die Vorspannung auf 0,8 MPa festgelegt. Wegen der sehr kleinen Messwerte und des anderen Herstellungsverfahrens gegenüber den Literaturwerten, wurde als Berechnungsgrundlage zur Auslegung der Zugversuche von einer Abzugsspannung σ_A von 0,025 MPa ausgegangen.

Um mit der zur Verfügung stehenden Zugprüfmaschine arbeiten zu können, durften die wirkenden Kräfte nicht zu klein sein. Deshalb wurden die Stempel für eine Abzugskraft F_A von minimal einem Newton ausgelegt. Durch die festgelegte Kraft F_A und die angenommene Abzugsspannung σ_A kann mit Formel 2 die mindestens benötigte Kontaktfläche A_{min} berechnet werden. Die Berechnung ist in Formel 7 dargestellt.

Formel 7 Minimalen Kontaktfläche für die Zugversuche mit Stempeln.

$$A_{min} = \frac{F_A}{\sigma_A} = \frac{1 \text{ N}}{0,025 \text{ MPa}} = 40 \text{ mm}^2$$

Auf dieser Grundlage wurden drei Formen für Stempel festgelegt. Die Angaben zu Größe und Form der untersuchten Stempel können der Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4 Größenangaben für Zugversuche bei Silikonstempeln.

Form Nr.	Form der Kontaktflächen	Größe der einzelnen Kontaktflächen	Anzahl der Kontaktflächen	Array	Gesamte Kontaktfläche
Z1	quadratisch	300 μm x 300 μm	484	22 x 22	43,6 mm ²
Z3	quadratisch	1000 μm x 1000 μm	40	5 x 8	40,0 mm ²
Z6	rund	Ø 350 μm	482	22 x 22	46,57 mm ²

Neben der Fläche und Form der Stempel wurden auch zwei Mischungsverhältnisse des Sylgard 184 getestet. Alle Stempel wurden mit der Standardmischung von 10:1 und einer weicheren Mischung mit einem Verhältnis von 20:1 hergestellt. Für die Zugversuche wurden neue Stempel nach dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Verfahren gegossen.

Als Gegenstück für die Stempel wurde ein polierter Silizium-Wafer eingesetzt. Der Wafer wurde mit doppelseitigem Klebeband auf die untere Einspannklemme geklebt. Nach jedem Wechsel der Stempel wurde der Wafer mit einem in Isopropanol getränkten, staubfreien Tuch gereinigt.

Um sicherzustellen, dass lediglich die Stempelfüße Kontakt zum Wafer haben, mussten Stempel und Wafer planparallel ausgerichtet werden. Hierzu wurde der Stempel mit definiertem Abstand auf den Wafer gelegt. Der Abstand wurde durch drei Stücke eines Wafers mit 350 µm Höhe definiert, welche zwischen Stempel und Wafer lagen.

Um die Ausrichtung der Stempel beizubehalten, wurde dieser mit Cyanacrylat an eine Gewindestange, welche von der oberen Einspannklemme gehalten wurde, geklebt. Das Cyanacrylat glückte hierbei eine Fehlausrichtung zwischen Probenaufnahme und Stempel aus. Nach Aufbringen des Klebers wurde obere Einspannung mit 1 N für 60 s auf den Stempel gedrückt. In dieser Zeit härtete der Kleber aus. Der Werkzeugabstand wurde in dieser Stellung auf 0,2 mm festgelegt. Im nächsten Schritt wurde der Stempel abgehoben und die Platzhalter vom Silikon des Stempels mit Hilfe einer Pinzette abgezogen. Anschließend wurde die Kraft auf 0 N gesetzt. Der Stempel wurde nun auf die Startposition gefahren, welche für Stempel mit einer Silikonmischung von 10:1 bei 0,045 mm und für eine Silikonmischung von 20:1 bei 0,135 mm über dem Stempel lag.

Der folgende Testablauf wurde nach dem Start automatisch durchgeführt. Hierbei wurde der Stempel bis zur eingestellten Anpresskraft auf den Wafer gedrückt. Wurde diese Kraft erreicht, verweilte der Stempel 20 s kraftgeregelt auf dem Wafer. Anschließend wurde der Stempel abgezogen und in die Startposition zurückgefahren. Jedes Verfahren erfolgte hierbei mit der definierten Geschwindigkeit v . Während des Testablaufs wurden die Position des Stempels, die Zeit und die Kraft dokumentiert.

3.5.2 Abzugskraft von UV-empfindlicher Klebefolie

Um die senkrechte Abzugskraft von der UV-lichtempfindlichen Folie zu testen wurden Stücke eines Wafers mit einer Zugprüfmaschine senkrecht von der Folie abgezogen. Hierzu wurden nach den in Kapitel 3.1 beschriebenen Verfahren Dummy-Dies mit einer Kantenlänge von 10 mm hergestellt. Die Proben wurden

nach der Belichtung mit doppelseitigen Klebeband auf eine Metallplatte aufgeklebt. Für die Testdurchführung wurde die Metallplatte in einer frei positionierbaren Einspannklemme der Zugprüfmaschine geklemmt. Als Angriffspunkt der Kraft wurde je eine Vierkantmutter senkrecht auf jeden Dummy-Dies geklebt. Über einen Draht wurde in der oberen Einspannklemme eine U-förmige Probeaufnahme befestigt. Die Verbindung zwischen Probe und Probeaufnahme wurde über einen Metallstift hergestellt, welcher durch die Öffnung der Mutter und zwei Bohrungen in der Probeaufnahme geführt wurde. Zur Versuchsdurchführung wurde nach der Fixierung der Probe die obere Einspannklemme nach oben bewegt, bis sich der Wafer vollständig vom Tape getrennt hatte. Der Aufbau ist in Abbildung 14 dargestellt.

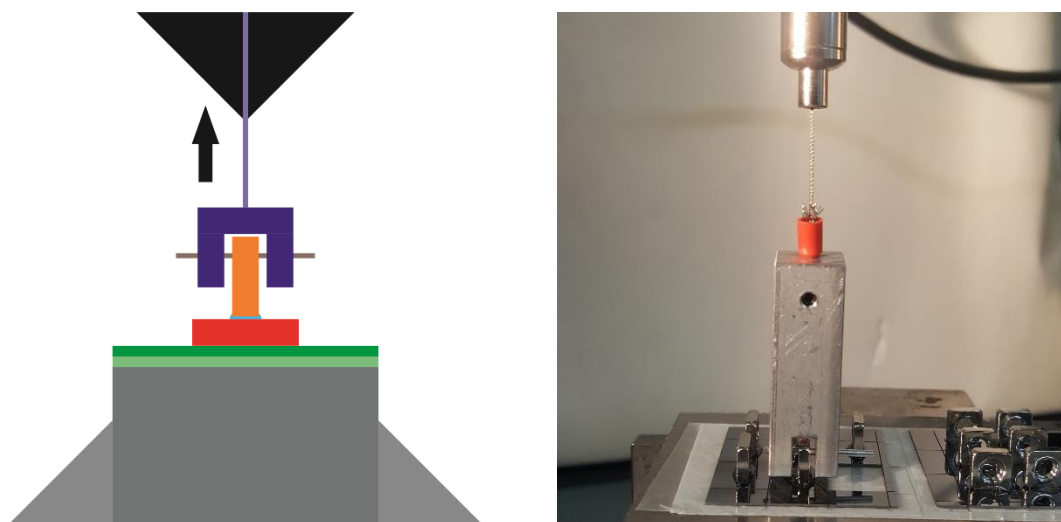


Abbildung 14 Links ist die Schematische Darstellung der Abzugsversuche von Dies auf der Sägefolie gezeigt. Die Probe ist mit doppelseitigen Klebeband (hellgrün) am Metallblock fixiert. Die Probe besteht aus der UV-lichtempfindlichen Folie (dunkelgrün) und dem Die (rot). Auf den Die ist eine Mutter (orange) geklebt. Eine U-förmige Probeaufnahme (dunkelblau) verbindet durch einen Metallstift (braun) die Mutter mit der Probeaufnahme. Der Pfeil zeigt die Abzugsrichtung der Probe. Rechts ist eine Fotografie des Aufbaus in der Zugprüfmaschine dargestellt.

3.5.3 Ermittlung der Klebekraft von ADWILL D-841

Um zu überprüfen, ob mit den verwendeten Belichtungsbedingungen die vom Hersteller angegebene Reduktion der Haftung erreicht werden kann, wurden Abzugsversuche durchgeführt. Die Abzugsversuche wurden angelehnt an die DIN EN 1939:2003-12 Verfahren 1 durchgeführt. Die Angaben des Herstellers zu Abzugswinkel und Abzugsgeschwindigkeit decken sich hierbei mit den Angaben der Norm. Die Angaben des Herstellers können Tabelle 1 entnommen werden.

Als Vorbereitung wurden 24 mm breite Streifen des Sägetapes ADWILL D-841 mit einer Länge von 30 cm zugeschnitten. Da hierfür kein spezielles Schneidegerät,

wie in der Norm beschrieben, zur Verfügung stand, wurden die Streifen mit einem Skalpell unter Zuhilfenahme eines Lineals zugeschnitten. Dies erfolgte in einem Raum mit Gelblicht, um eine vorzeitige Belichtung zu verhindern. Als Substrat zum Abziehen des Tapes wurden aus einem Siliziumwafer mit einem Durchmesser von 100 mm 30 mm breite Streifen ausgesägt. Dies ermöglichte das Abziehen des Tapes über eine Länge von etwa 90 mm - 95 mm.

Um den Wafer in der Zugprüfmaschine einspannen zu können, wurde der Wafer mit doppelseitigem Klebeband auf eine Metallplatte geklebt. Die Metallplatte konnte über eine Einspannklemme der Zugprüfmaschine befestigt werden. Vor dem Aufbringen des Tapes wurde der Wafer gründlich mit Aceton und Isopropanol, unter Zuhilfenahme eines saugfähigen und fusselfreien Tuchs, dreifach gereinigt. Der Streifen des Tapes wurde mittig auf den Streifen des Wafers geklebt. Das eine Ende des Streifens ragte knapp über die Oberkante des Wafers hinaus. Nachdem der Streifen aufgeklebt wurde, folgte das Andrücken der Streifen mit einer von Hand betätigten Andruckrolle mit einem Gewicht von zwei Kilogramm durch zweifaches Überrollen. Der nach unten überstehende Teil des Streifens wurde in Richtung der oberen Einspannklemme geklappt und dort eingespannt. Um belichtete Proben nach der in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Methode herstellen zu können, wurden diese Proben zuerst auf den Wafer geklebt und belichtet, bevor der Wafer auf die Metallplatte zur Fixierung aufgebracht wurde.

Der Abzug wurde durchgeführt, indem die obere Einspannklemme konstant mit einer Geschwindigkeit von 300 mm/min abgezogen wurde. Hierbei wurden die Kraft und die Dehnung aufgezeichnet. Die Auswertung und Ausgabe in N/10 mm erfolgt normkonform durch die Software der Zugprüfmaschine. Der Aufbau ist in Abbildung 15 dargestellt.

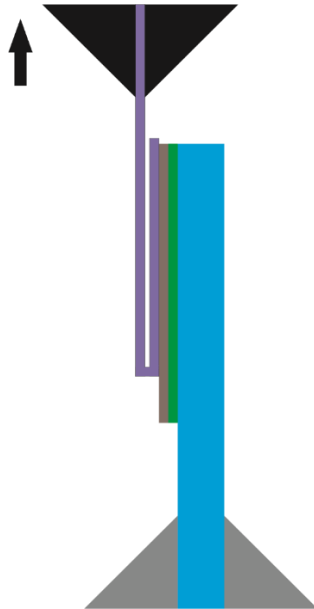


Abbildung 15 Rechts ist die schematische Darstellung der Zugversuche zur Ermittlung der Klebekraft der UV-empfindlichen Klebefolie dargestellt. Das Tape (lila) wird in Pfeilrichtung vom Wafer (braun) abgezogen. Eine Fotografie der eingespannten Probe in der Prüfmaschine ist rechts dargestellt.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche dargestellt.

4.1 Klebkraft von ADWILL D-841

Es wurden je drei Proben der belichteten und unbelichteten Folie untersucht. Die Ergebnisse werden in Tabelle 5 gezeigt.

Tabelle 5 Kräfte der Abzug der unbelichteten UV-empfindlichen Klebefolie.

Probe	Abzugskraft in N/25 mm
Unbelichtet 1	22,6
Unbelichtet 2	23,0
Unbelichtet 3	22,5
Belichtet 1	0,003
Belichtet 2	0,003
Belichtet 3	0,007

Der Mittelwert der Abzugskraft für das unbelichtete Tape beträgt $22,7 \text{ N/25 mm} \pm 2,5 \text{ N/25mm}$. Bei der Messung wurde das Tape mit einer scharfen 180° Kurve abgezogen und der abgezogene Teil wurde sichtbar gedehnt (siehe Abbildung 16).

Der Mittelwert der Abzugskraft für das belichtete Tape beträgt $0,004 \text{ N/25 mm} \pm 0,002 \text{ N/25 mm}$. Die belichtete Folie zeigte nahezu keine Haftung gegenüber dem Siliziumwafer mehr. Dies hatte zur Folge, dass die Folie in einem deutlichen sichtbaren Bogen abgezogen wurde. Dies zeigt Abbildung 16.



Abbildung 16 Links: Abzugsversuch mit unbelichteter Folie. Die Klebefolie macht an der Abzugsfront eine scharfe 180° Kurve. Rechts: Abzugsversuch mit belichteter Folie. Die Klebefolie wird in einem großen Bogen abgezogen.

4.2 Abzugsversuche von UV-empfindlicher Klebefolie

Für die Abzugsversuche von der UV-lichtempfindlichen Folie wurden zwei Proben mit je sechs quadratischen Stücken eines Wafers mit einer Kantenlänge von 10 mm untersucht.

Bei der ersten Probe löste sich bei allen sechs Durchführungen das Stück Wafer plötzlich von der Klebefolie. Dies war während der Durchführung auch durch ein knallendes Geräusch hörbar. Der Abrisspunkt ist bei allen sechs Kurven durch den Hochpunkt kurz vor dem Ende der Aufzeichnung sichtbar. Die Kraft stieg bei Abzug 11 bis Abzug 14 gleichmäßig an. Bei Abzug 15 ist bei einer Dehnung von 0,48 mm ein Einbruch der Kraft zu erkennen. Bei Abzug 16 ist bei einer Dehnung von 0,45 mm - 0,6 mm eine Änderung des Kraftanstiegs sichtbar. Während der Durchführung konnte sowohl bei Abzug 15 wie auch Abzug 16 eine Verdrehung der Probenaufnahme zum Zeitpunkt des veränderten Kraftanstiegs beobachtet werden, welche auf die maximale Anzugskraft keine Auswirkung hat. Die Ergebnisse der ersten Probe sind in Abbildung 17 dargestellt.

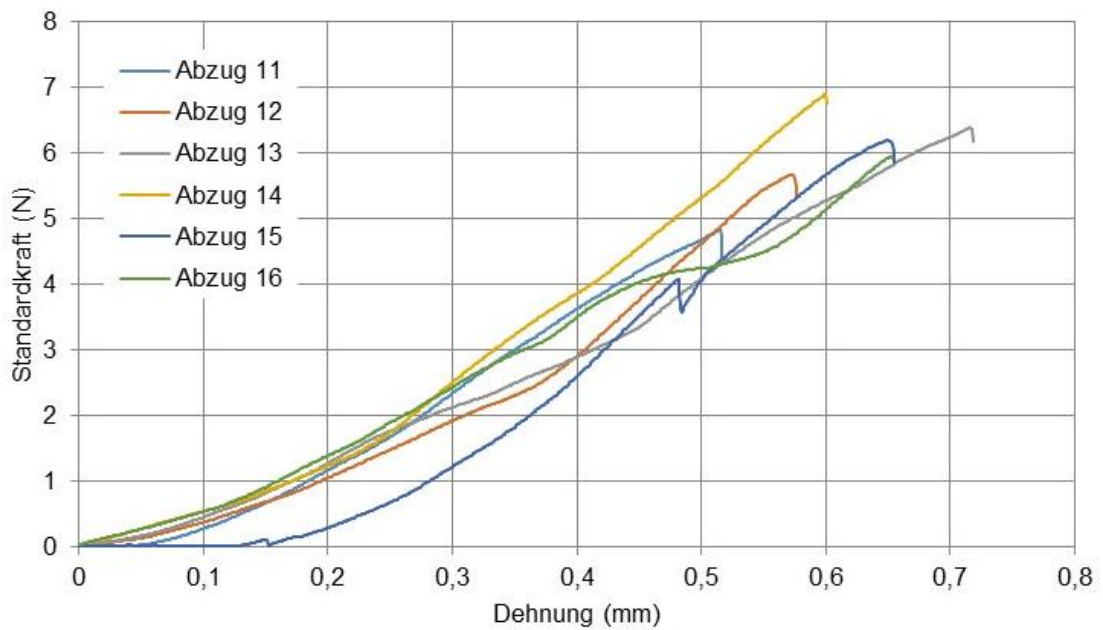


Abbildung 17 Ergebnisse von Probe 1 beim Abzug von Dummy-Dies mit Kantenlänge 10 mm.

Bei der zweiten Probe konnte lediglich bei Abzug 21 ein plötzliches Abreißen der Probe von der Klebefolie, wie bei den Abzügen 11 bis 16, beobachtet werden. Bei den Abzügen 22 bis 26 konnte ein Abschälen des Wafers beobachtet werden. Hierbei löste sich zuerst eine Seite des Wafers und kippte beim Abziehen. Dies ist in Abbildung 19 dargestellt. Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse der zweiten Probe.

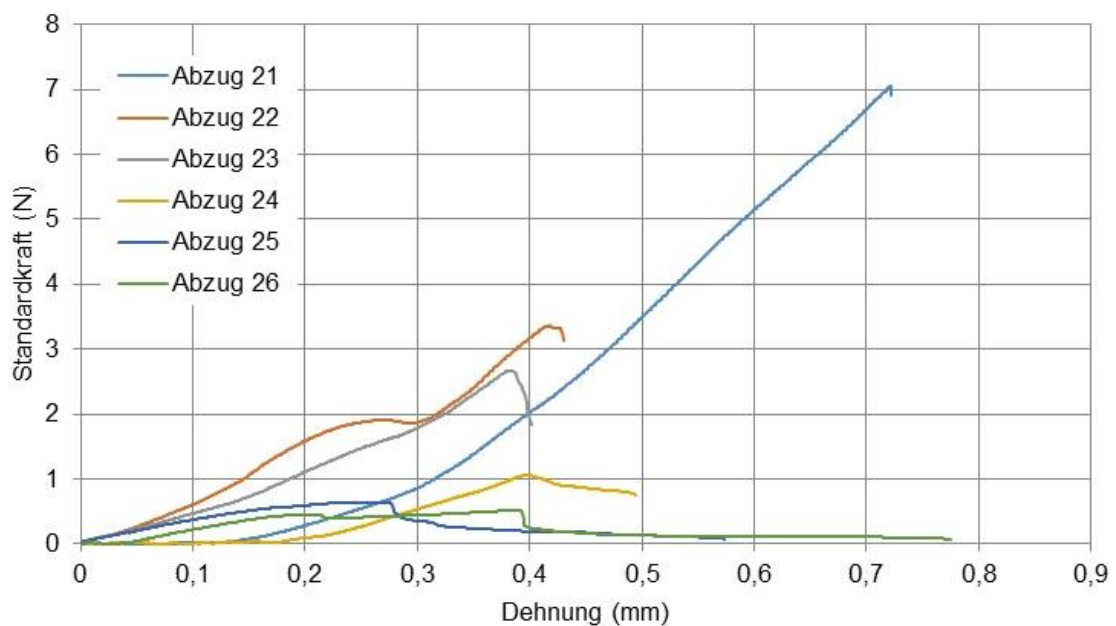


Abbildung 18 Ergebnisse von Probe 2 beim Abzug von Dummy-Dies mit Kantenlänge 10 mm.

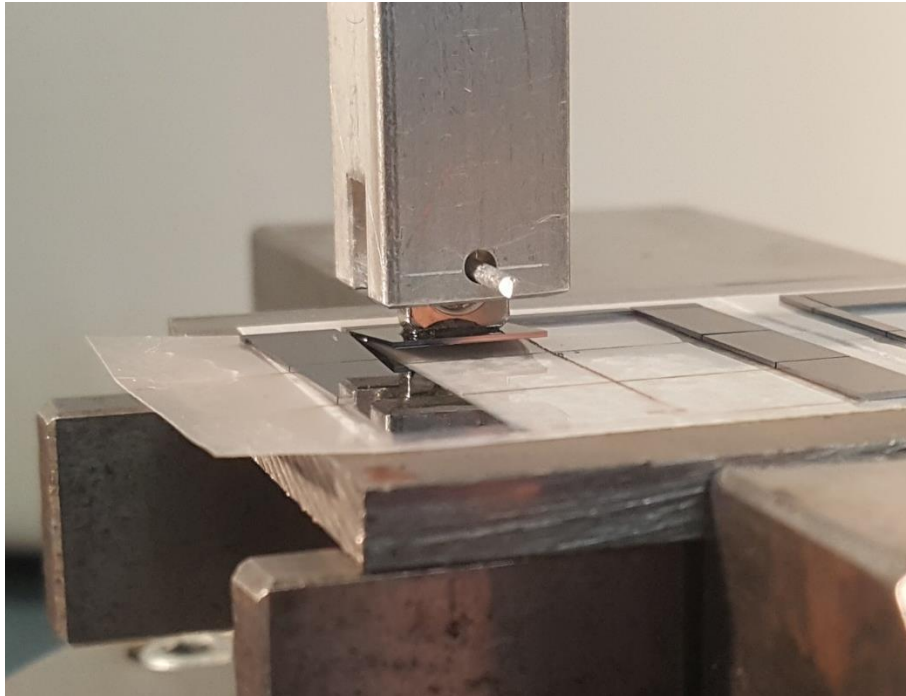


Abbildung 19 Abschälen des Stücks Si-Wafer von ADWILL D-841 bei Abzug 18.

Neben der grafischen Auswertung wurden der Mittelwert der maximalen Kraft beim Ablösen von Wafer und Klebefolie ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6 Kräfte beim Abzug von Dummy-Dies mit einer Kantenlänge von 10 mm.

Probe	Maximale Kraft in N	Maximale Spannung in MPa
1	$5,99 \pm 0,63$	$0,0599 \pm 0,01$
2	$2,54 \pm 2,27$	$0,0254 \pm 0,02$

4.3 Abzugsversuche zur Haftung von Stempeln

Um einen Überblick über das Verhalten der Stempel zu bekommen, wurden unterschiedliche Stempel vermessen. Zur Auswertung wurde die maximale Kraft während des Abziehens ermittelt. Als Standardausgabe wurde die gemessene Kraft über der Zeit dargestellt. Dies ist beispielhaft in Abbildung 20 an der Probe Z11 mit 10:1 Silikonmischung dargestellt.

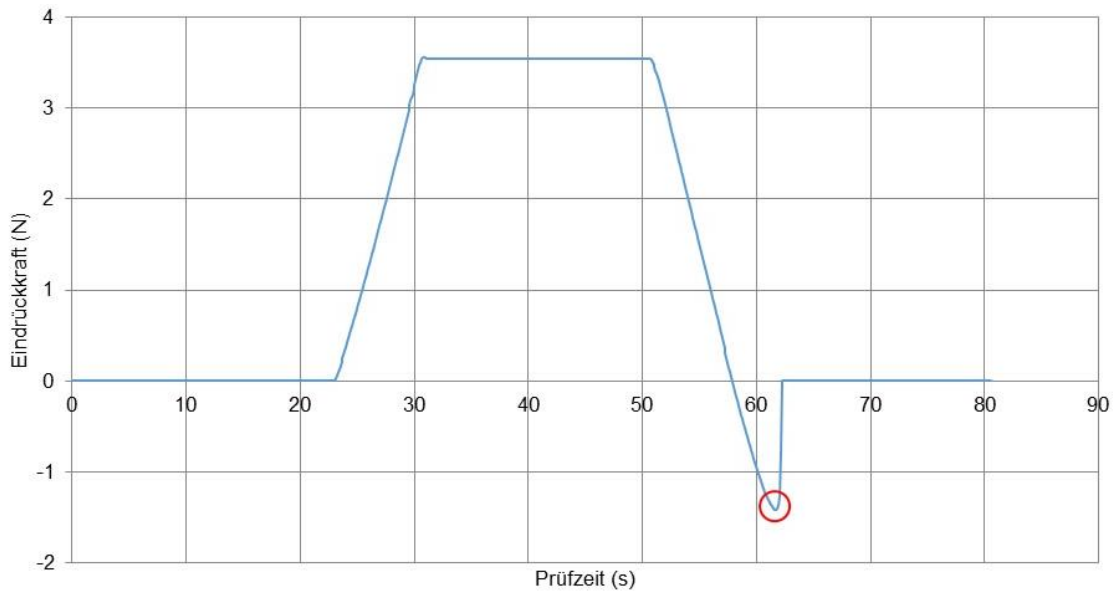


Abbildung 20 Aufgenommene Kraftkurve einer Zugprüfung der Probe Z11 mit einer Silikonmischung 10:1 bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von 0,6 mm/min. Nach 23 s berührt der Stempel die Probe und beginnt auf den Wafer zu drücken. 31 s nach dem Start ist die definierte Anpresskraft erreicht und die kraftgeregelte Haltezeit von 20 s beginnt. Nach der Haltezeit wird der Stempel von der Probe abgezogen. Nach 58 s geht der Stempel von der Andrück- in die Zugphase über. Rot eingekreist ist der ausgewertete Tiefpunkt der Kraft (Kraftmaximum beim Abziehen). 62 s nach dem Start ist der Stempel vollständig vom Wafer getrennt und fährt zurück in die Startposition.

Um die verschiedenen Stempelformen trotz unterschiedlicher Flächen vergleichen zu können, wird im Folgenden die Abzugsspannung betrachtet. Die Versuche wurden mit einer Abzugsgeschwindigkeit von 0,6 mm/min durchgeführt, um sie mit den Werten von Paretkar et al. [13] vergleichen zu können. Um die Reproduzierbarkeit der einzelnen Stempel nachzuweisen, wurden je drei aufeinanderfolgende Messzyklen mit einem Stempel durchgeführt.

Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse der Stempel mit Form Z1 (Array 22 x 22; quadratische Füßchen mit 300 µm Kantenlänge).

Bei den Stempeln mit einer Silikonmischung von 10:1 fällt auf, dass die Stempel Z11 und Z12 nahezu identische Werte aufweisen. Die Abzugsspannung des Stempels Z13 weist um etwa eine Drittel geringere Abzugskraft auf.

Bei den Stempeln mit einer Silikonmischung von 20:1 liegen die Proben Z11 und Z12 im Bereich um 0,035 MPa. Die Probe Z13 liegt etwa 0,01 MPa unter diesem Wert. Bei allen Proben außer der Probe Z11 mit einer 20:1 Silikonmischung fällt auf, dass das Maximum der Abzugsspannung mit jedem erneuten Abzug abnimmt.

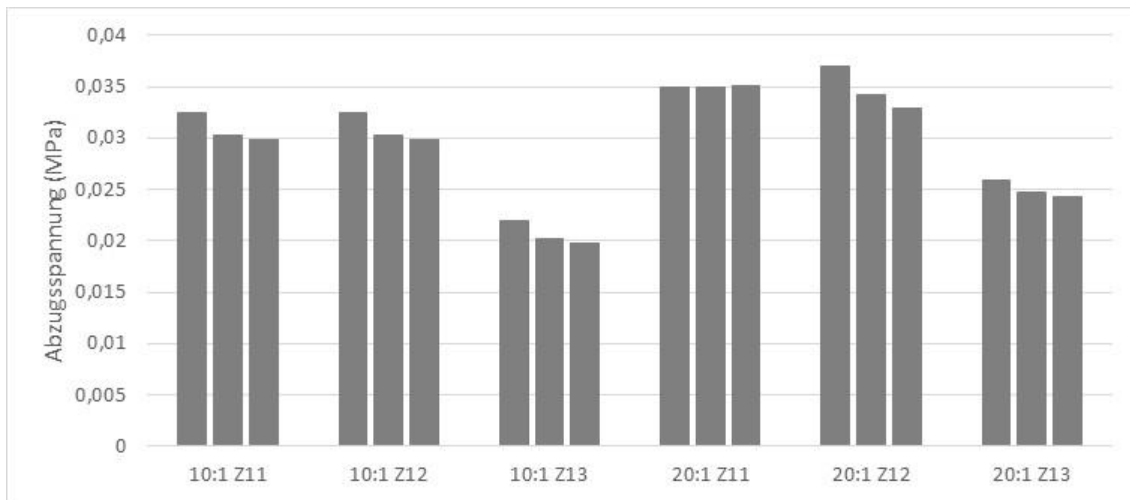


Abbildung 21 Messergebnisse der Stempel mit Form Z1.

Die Ergebnisse der Stempel mit Form Z2 (Array 5 x 8; quadratische Füßchen mit 1 mm Kantenlänge) sind in Abbildung 22 dargestellt.

Bei den Stempeln mit einer Silikonmischung von 10:1 fällt auf, dass die Stempel Z31 und Z32 nahezu identische Werte aufweisen. Die Abzugsspannung des Stempels Z33 weist um etwa eine Drittel geringere Abzugsspannung auf.

Bei den Stempeln mit einer Silikonmischung von 20:1 liegen die gemessenen Abzugsspannungen in einem Bereich zwischen 0,04 MPa und 0,07 MPa. Bei allen Proben außer der Probe Z33 mit einer 10:1 Silikonmischung fällt auf, dass das der Abzugsspannung mit jedem erneuten Abzug abnimmt, jedoch im Bereich der ersten Durchführung liegt.

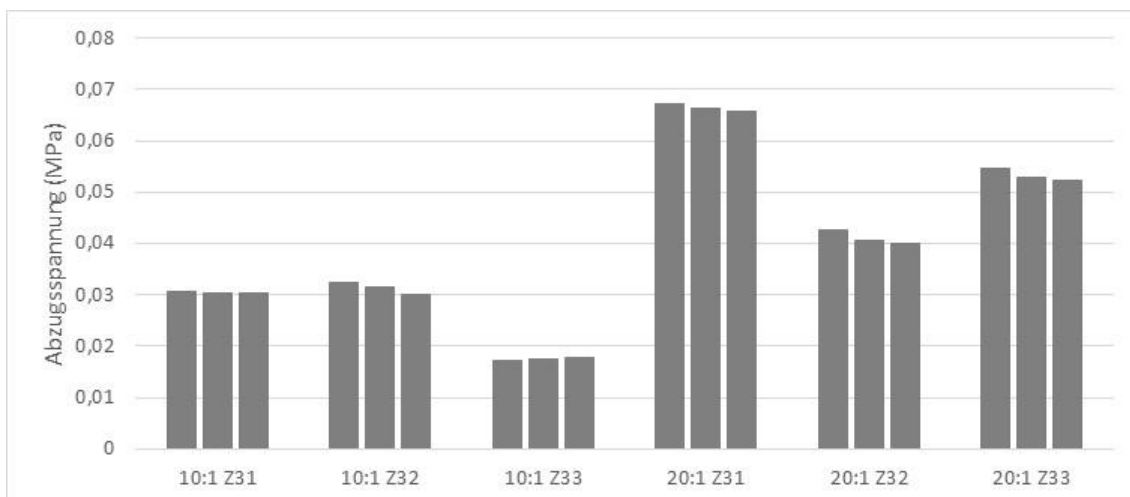


Abbildung 22 Messergebnisse der Stempel mit Form Z3.

In Abbildung 23 werden die Ergebnisse der Stempel mit Form Z6 (Array 22 x 22; runde Füßchen mit 350 µm Durchmesser) dargestellt.

Bei den Stempeln mit einer Silikonmischung von 10:1 fällt auf, dass die Stempel Z62 und Z63 nahezu identische Werte aufweisen. Die Abzugsspannung des Stempels Z61 weist um etwa eine ein Drittel geringere Abzugskraft auf. Bei diesen drei Proben liegen alle drei Abzüge im gleichen Bereich.

Bei den Stempeln mit einer Silikonmischung von 20:1 liegen alle Stempel im gleichen Bereich.

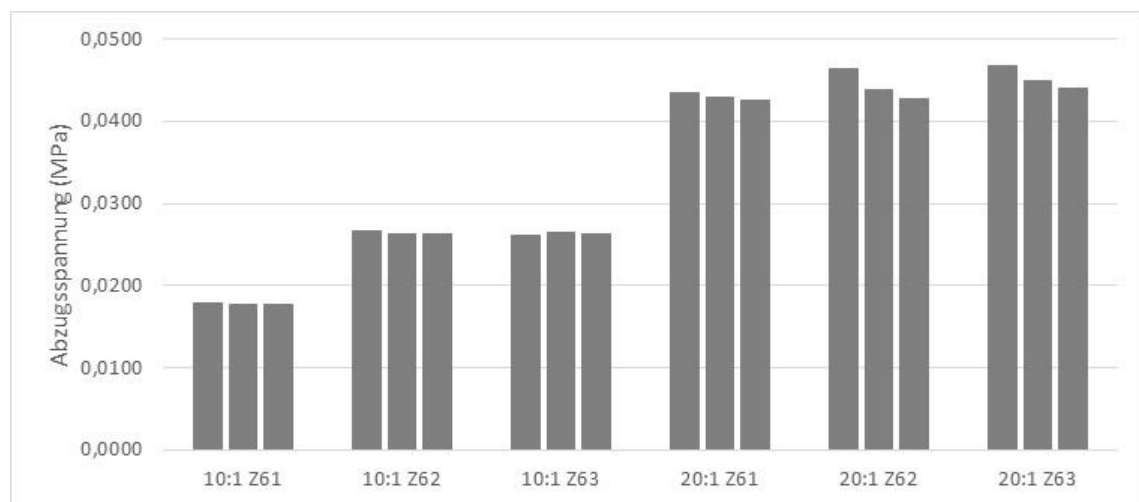


Abbildung 23 Messergebnisse der Stempel mit Form Z6.

Die Mittelwerte der gemessenen Kräfte für die Silikonmischungen sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7 Kräfte beim Abzug von Stempeln.

	Form Z1 (Array 22 x 22; quadratische Füßchen mit 300 µm Kantenlänge)	Form Z3 (Array 5 x 8; quadratische Füßchen mit 1mm Kantenlänge)	Form Z6 (Array 22 x 22; runde Füßchen mit 350 µm Durchmesser)
Silikon 10:1	0,027 ± 0,003 MPa	0,026 ± 0,006 MPa	0,024 ± 0,004 MPa
Silikon 20:1	0,032 ± 0,005 MPa	0,054 ± 0,01 MPa	0,044 ± 0,001 MPa

Der Gesamtdurchschnitt für die Abzugsspannungen für die Silikonmischung 10:1 beträgt 0,025 MPa ± 0,006 MPa und für die 20:1 Mischung 0,043 MPa ± 0,011 MPa.

Um den Einfluss von höheren Abzugsgeschwindigkeiten zu erfassen, wurde ein Stempel jeder Kombination aus Form und Silikonmischung bei Abzugsgeschwindigkeiten zwischen 0,3 mm/min und 10 mm/min getestet. Man sieht, dass die Abzugsspannung bei allen Stempeln mit zunehmender Abzugsgeschwindigkeit zunimmt. Der Durchschnitt für die Abzugsspannungen bei $v = 10$ mm/min für die Silikonmischung 10:1 beträgt $0,065 \text{ MPa} \pm 0,014 \text{ MPa}$ und für die 20:1 Mischung $0,095 \text{ MPa} \pm 0,018 \text{ MPa}$. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 24 dargestellt.

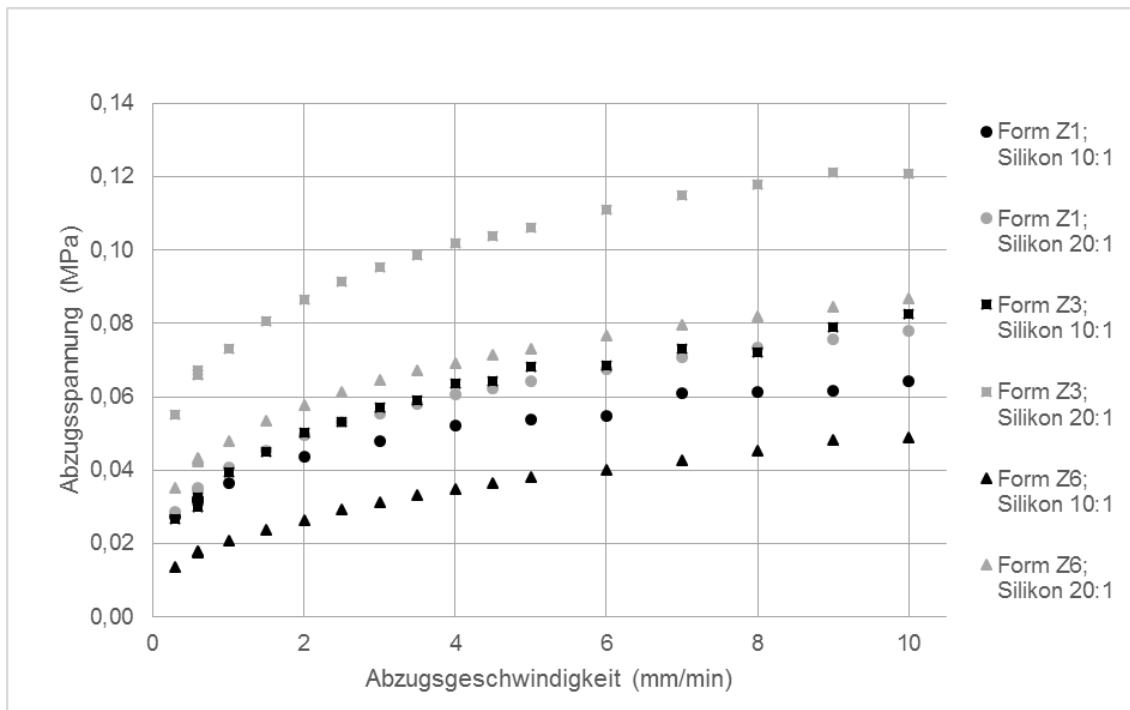


Abbildung 24 Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit auf die Abzugsspannung.

Um den Einfluss der Anpressspannung zu ermitteln, wurden zwei Proben mit Anpresskräften zwischen 0,5 N und 10 N getestet. Die Abzugsgeschwindigkeit wurde hierbei konstant bei 0,6 mm/min gehalten. Die Ergebnisse werden in Abbildung 25 dargestellt. Es zeigt, dass bei Stempeln mit einer Silikonmischung von 10:1 die Anpressspannungen unter 0,05 MPa zu einer verminderten Abzugsspannung führten. Über 0,05 MPa Anpressspannung ist der Einfluss gering. Bei den Stempeln mit einer Silikonmischung von 20:1 verminderte sich die Abzugsspannung bei Anpressspannungen bis 0,15 MPa. Über diesem Wert waren im gemessenen Bereich keine Auswirkung mehr sichtbar.

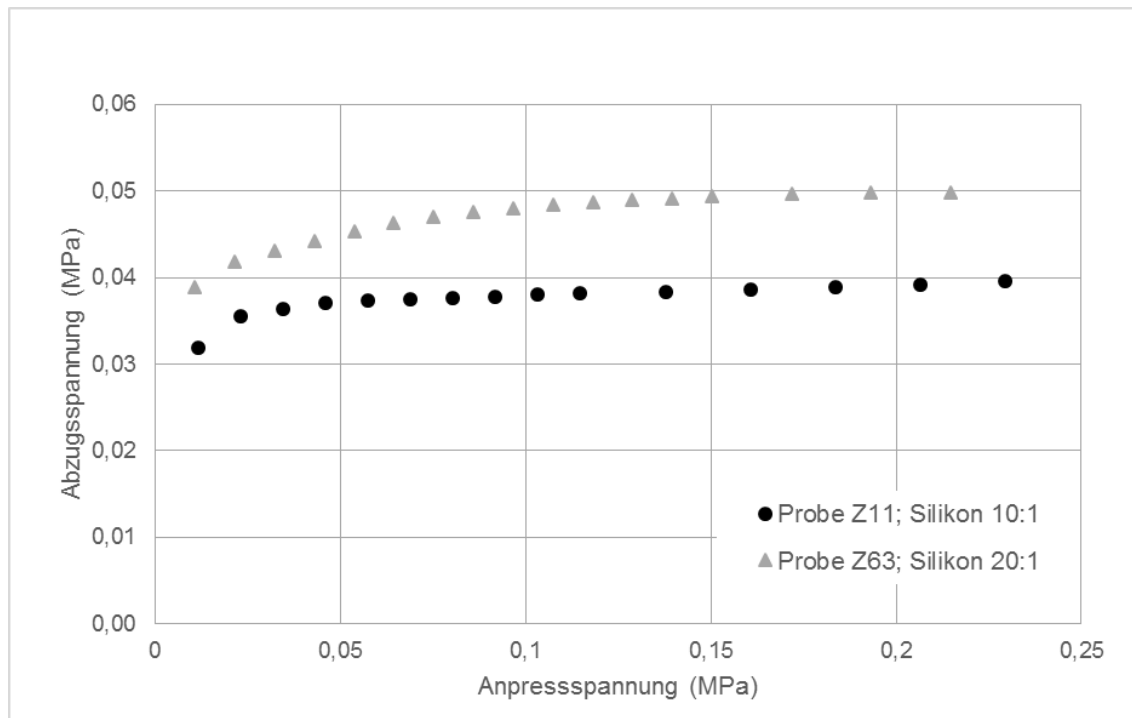


Abbildung 25 Einfluss der Anpressspannung auf die Abzugsspannung.

4.4 Stempel

Dieses Unterkapitel dokumentiert und charakterisiert die hergestellten Stempelformen und Stempel nach dem neuen Herstellungsverfahren.

Die mit dem Laser hergestellten Formen aus Stahlfolie wurden mit dem Mikroskop untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Öffnungen für die Stempelfüßchen vom Laser nicht exakt quadratisch ausgeschnitten werden können. Man erkennt ungleichmäßige Schnittkanten und abgerundete Ecken (siehe Abbildung 26). Die Streifen auf der Metalloberfläche sind die Oberflächenrauheit, welche durch die Produktion der Metallfolie entsteht.

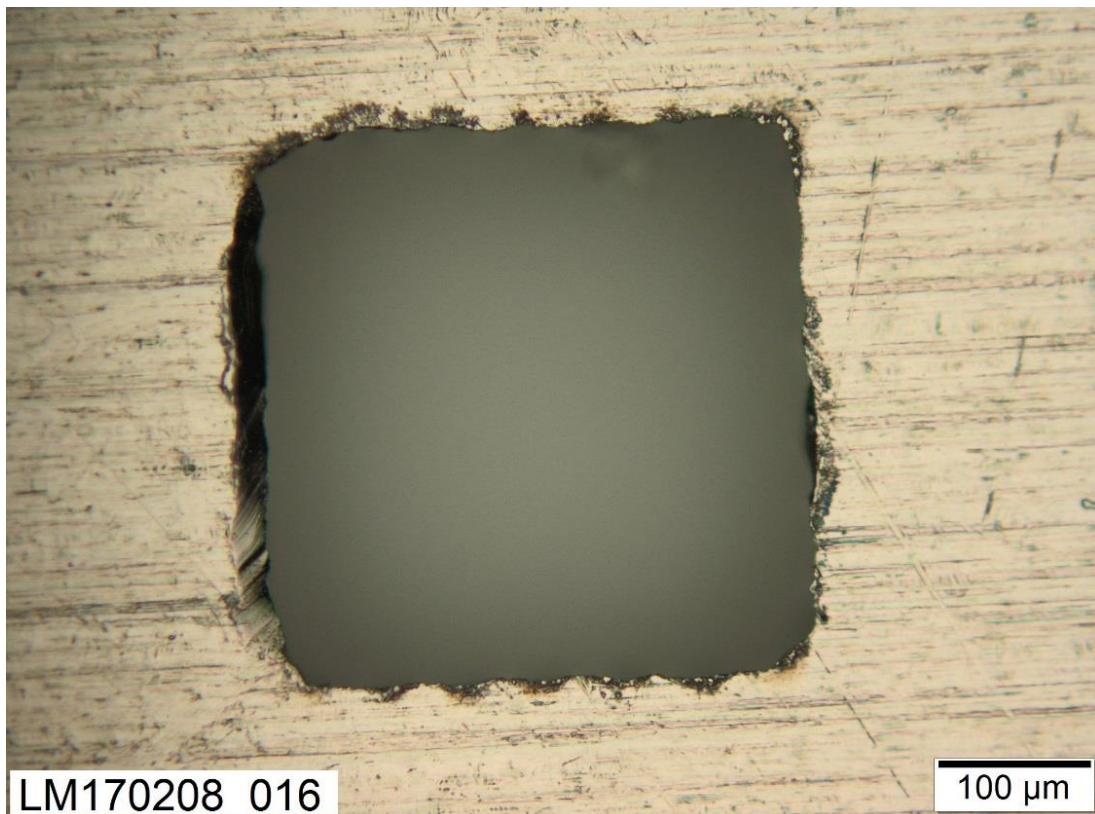


Abbildung 26 Lichtmikroskopische Aufnahme eines Ausschnitts einer Stempelform. Darstellung einer Öffnung zur Abformung eines Füßchens, aufgenommen von der Seite, welche beim Ausschneiden auf der von Laser abgewandten Seite lag.

Bei der Darstellung eines Stempelfüßchens der Vorlage V1 im Auflichtmikroskop mit Differentialinterferenzkontrast (Abbildung 27) erkennt man eine ebene Stempelfläche. Man erkennt die Stempelfläche, welche entsprechend der Gussform abgerundete Ecken und den ungleichmäßigen Rand zeigt. Um das Stempelfüßchen herum erkennt man einen rauen Bereich, welcher durch den Schmelzprozess beim Ausschneiden der Stempelform entsteht und beim Gießen mit abgebildet wird. Die Fläche außerhalb des Stempelfüßchens zeigt streifenförmige Unebenheiten. Diese entstehen durch die Abbildung der Oberfläche der Metallfolie.

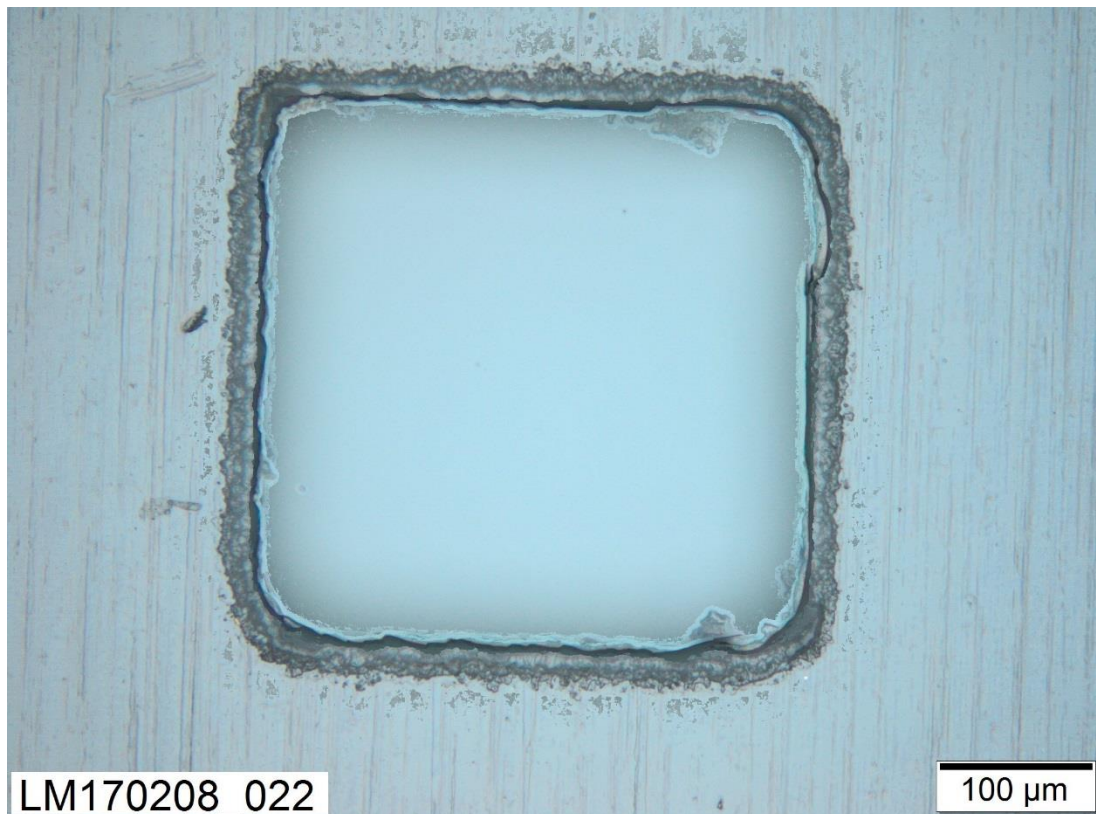


Abbildung 27 Stempelfüßchen eines Stempels nach Vorlage V1, dargestellt in einem Auflichtmikroskop mit Differentialinterferenzkontrast.

Zur Darstellung und Überprüfung der Form und der Seitenwände der Stempelfüßchen wurden Aufnahmen im Rasterelektrodenmikroskop (REM) angefertigt. Um die hierfür benötigte elektrische Leitfähigkeit herzustellen, wurden die Stempel mit einer dünnen Schicht Gold-Palladium beschichtet. Die Schichtdicke lag im Bereich $< 100 \text{ nm}$. Für die Überprüfung der Abformung wurden Stempel mit Teststrukturen erstellt, welche kleiner als die tatsächlichen Stempel sind. Abbildung 28 zeigt ein rundes Stempelfüßchen mit einem Durchmesser von $100 \text{ }\mu\text{m}$, Abbildung 29 zeigt ein Stempelfüßchen in Kreuzform, bei dem jede Kante $100 \text{ }\mu\text{m}$ lang ist. Beide Stempelfüßchen weisen eine glatte Stempelfläche auf. Die Seitenwände weisen eine ungleichmäßige raue Struktur auf. Am unteren Ende der Seitenwand weisen beide Stempel eine umlaufende Vertiefung auf. Bei der kreuzförmigen Struktur zeigen sich abgerundete Ecken der Stempelfläche. Die Höhe der Stempelfüßchen wurde im REM ausgemessen und mit einem Laserscanningmikroskop überprüft. Die Höhe der Stempelfüßchen lag abhängig von der Probe bei $106 \text{ }\mu\text{m} - 110 \text{ }\mu\text{m}$.

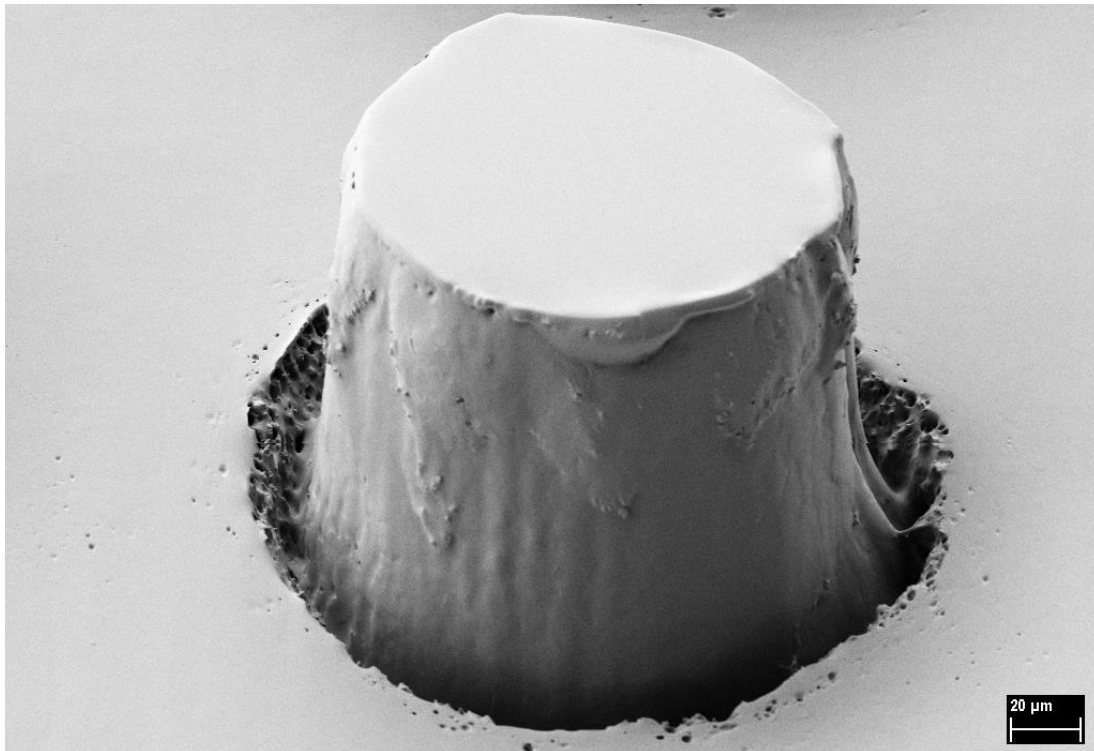


Abbildung 28 REM-Aufnahme eines runden Stempelfüßchen mit einem vorgegebenen Durchmesser von 150 µm.

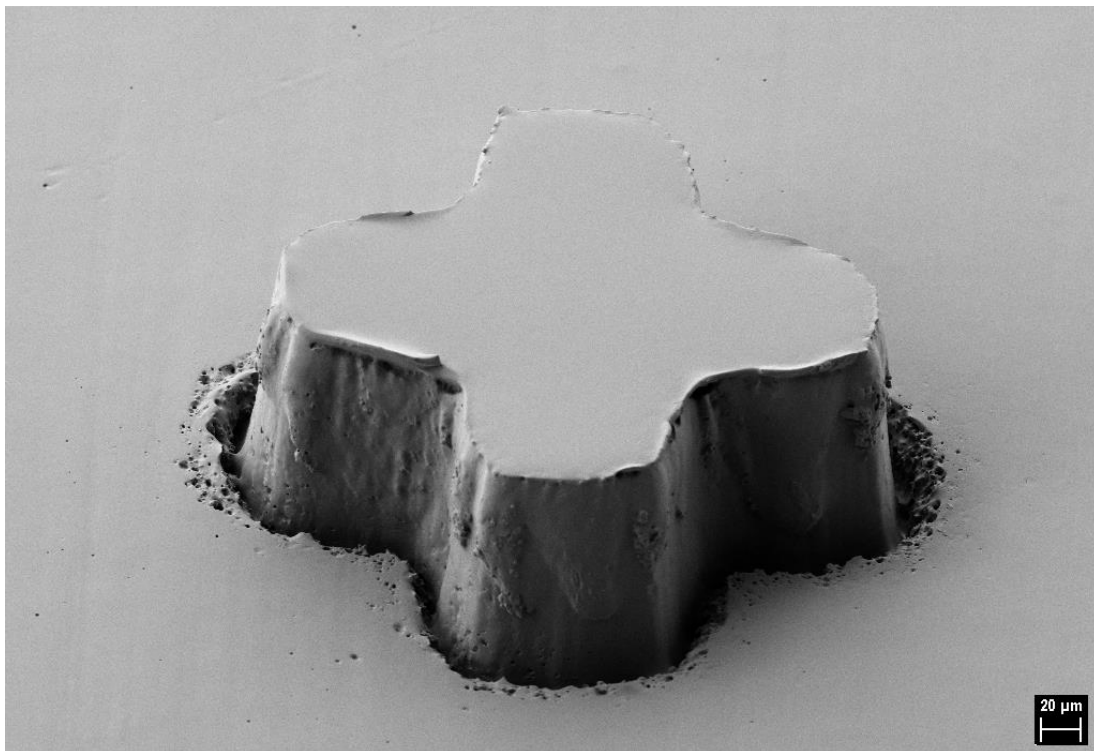


Abbildung 29 REM-Aufnahme eines Stempelfüßchens in Kreuzform mit einer Kantenlänge von 100 µm.

4.5 Silikonstempelverfahren

Mit dem beschriebenen Verfahren konnten Arrays von Dummy-Dies umgesetzt werden. Jede präparierte Probe war groß genug um vier Arrays der Größe 7 x 7 abheben zu können. Die abgehobenen Dummy-Dies einer Probe wurden zuerst alle auf ein Zielsubstrat abgesetzt. Gegen Ende der Versuchsreihen wurde jedes Array auf ein einzelnes Zielsubstrat abgesetzt, da dies die bessere Grundlage für die weiteren Versuche zur Einbettung der Dummy-Dies bot. Zwei Beispiele für Dummy-Dies auf Zielsubstraten zeigt Abbildung 30.

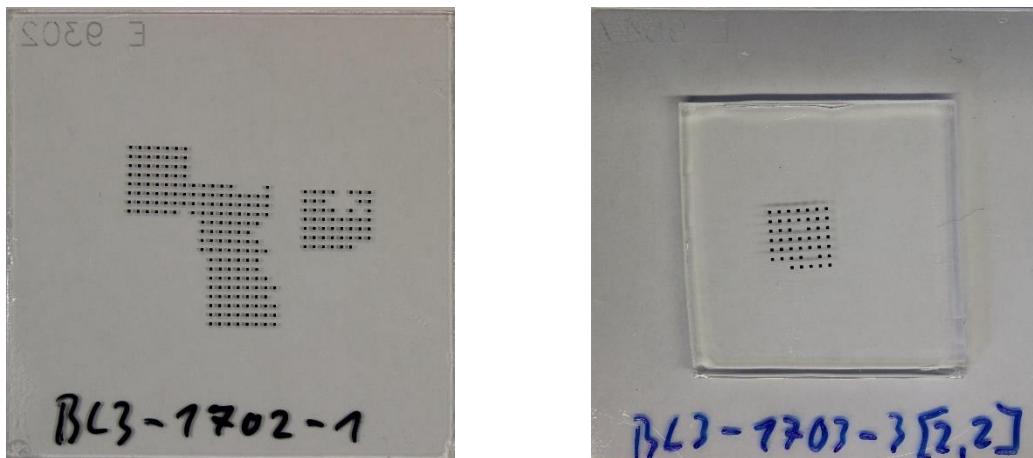


Abbildung 30 Links: Abgesetzte Dummy-Dies der Probe BL3-1702-3 auf Glas mit Zucker Rechts: Abgesetzte Dummy-Dies der Probe BL3-1703-3 auf Silikon mit Zucker beschichtet.

Auffällig waren die großen Unterschiede zwischen den einzelnen Proben. Auch wenn zwei Proben mit den gleichen Parametern hergestellt und gleichzeitig belichtet wurden, konnten die Ergebnisse stark voneinander abweichen. Bei der Proben BL3-1704-3 blieben lediglich 25 Dummy-Dies auf der Probe zurück, wohingegen 134 Dummy-Dies bei Probe BL3-1704-3 kleben blieben. Die beiden Proben werden in Abbildung 31 nach dem Abheben dargestellt.

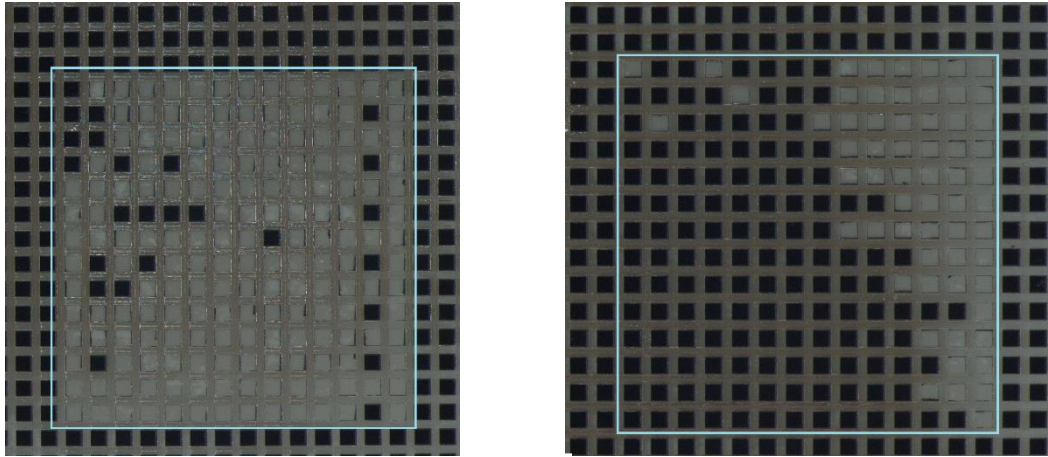


Abbildung 31 Links: Probe BL3-1704-3 nach viermaligem Abheben; Rechts: Probe BL3-1704-4 nach viermaligem Abheben; Hellblau markiert sind die Bereiche, welche abgehoben werden sollten.

Die Reproduzierbarkeit der Umsetzung kann nicht sichergestellt werden. Es fällt auf, dass die Dummy-Dies sich abhängig von der Probe schlecht (unter 40 %) oder gut (über 80 %) abheben lassen. Hierbei ist die Wahl des Stempels irrelevant. Fehler beim Absetzen auf die Zielsubstrate traten bei den durchgeführten Versuchen nicht auf. Die Ergebnisse bezüglich Zuverlässigkeit der Abnahme aller Proben nach dem aktuellen Verfahren werden in Tabelle 8 gezeigt.

Tabelle 8 Ergebnisse des Umsetzens.

Probe	Array	Korrekt umgesetzt				Umgesetzter Anteil
		1.	2.	3.	4.	
BL3-1701-2	7 x 7	0	0	0	0	0 %
BL3-1701-3	7 x 7	39	41	38	41	81 %
BL3-1702-1	8 x 8	55	57	58	48	85 %
BL3-1702-2	7 x 7	17	21	18	19	38 %
BL3-1702-3	7 x 7	47	45	47	44	93 %
BL3-1703-1	7 x 7	0	0	0	0	0 %
BL3-1703-2	7 x 7	0	1	0	0	1 %
BL3-1703-3	7 x 7	43	36	47	45	87 %
BL3-1703-4	7 x 7	13	11	17	21	32 %

5 Zusammenfassung und Diskussion

5.1 Verfahren

Das Umsetzen der Dies in einem parallelen Verfahren setzte sich gegenüber den seriellen Verfahren durch. Bei seriellen Verfahren wie dem Pick-and-Place können die Dies beliebig platziert und somit alle Abstände unabhängig von den Vorgaben der Fertigung gewählt werden. Hierbei addieren sich jedoch die Toleranzen der Platziergenauigkeit für die relativen Abstände. Da beim Umsetzen der Dies für das Neuro-Flex-Array die relativen Abstände der 49 Dies die höchste Priorität haben, bietet das parallele Umsetzen die besseren Voraussetzungen für die Einhaltung der Vorgaben. Des Weiteren kann mit parallelen Verfahren die Größe des Arrays ohne Erhöhung Aufwands beliebig verändert werden.

Das Greifen der Bauteile durch mechanische Greifer konnte bei der Umsetzung eines parallelen Verfahrens durch den überproportional hohen Aufwand für die Fertigung und Anordnung der Greifer ausgeschlossen werden. Eine Aufnahme durch ein Vakuum bietet unter optimalen Bedingungen nicht die Kräfte, welche mit Silikonstempeln aufgebracht werden können. Die Stempeltechnologie bietet somit das geeignetste Verfahren für das Umsetzen der Dies.

5.2 Stempelherstellung

Die Untersuchung der hergestellten Stempel zeigt, dass die Abformung maßgeblich durch die verwendete Form beeinflusst wird. Die Oberseite der Stempelfüßchen wird durch die verwendeten Petrischalen geformt. Dies sorgt für eine gleichmäßige und ebene Stempelfläche. Die verwendeten Herstellungsverfahren für die Stempelformen aus Metallfolie geraten bei Strukturen im Mikrometerbereich durch die Auflösung des verwendeten Lasers jedoch an ihre Grenzen (Abbildung 26). Die Folgen zeigen sich in allen Darstellungen der Stempelfüßchen (Abbildung 27 bis Abbildung 29). Die ungleichmäßigen Ränder und Seitenwände der Stempelformen werden exakt in den Silikonstempeln abgebildet. Auch das geschmolzene Material, welches sich während dem Schneiden auf der Oberseite der Stempelform sammelt, wird bei der Abformung an den Stempelfüßchen sichtbar. Für die Anwendung der Stempel zum Umsetzen der Dies bietet das Ausschneiden der Formen

mit diesem Laser jedoch ein ausreichend gutes Verfahren. Da die Stempelfläche größer als die Fläche der Dies ist, spielen die Randbereiche der Stempel beim Umsetzen keine Rolle. Für Verfahren, bei denen die Randbereiche relevant sind, muss die Herstellung der Formen jedoch optimiert werden. Die Höhe der Stempel lag um bis zu 10 % über der Dicke der Metallfolie. Diese Differenz entstand durch eine dünne Silikonschicht, welche zwischen der Petrischale und der Metallfolie entstand.

5.3 Stempeltechnologie

Die durchgeführten Abzugstests konnten die Wirksamkeit des genutzten Belichtungsverfahrens nachweisen. Die Haftkraft der ADWILL D-841 Folie wurde im belichteten und unbelichteten Zustand ermittelt. Für die unbelichtete Folie beträgt der gemessene Wert $22,7 \text{ N/25 mm} \pm 2,52 \text{ N/25 mm}$. Der ermittelte Wert fällt in den Bereich der Herstellerangabe von 25 N/25mm . Auffällig während der Durchführung war die starke Dehnung der Folie (Abbildung 16), welche auf die Ergebnisse jedoch keinen Einfluss hat. Bei den belichteten Proben konnte eine Abzugskraft von $0,004 \text{ N/25 mm} \pm 0,002 \text{ N/25 mm}$ gemessen werden. Dieser Wert liegt deutlich unter der Herstellerangabe mit $0,05 \text{ N/25 mm}$. Während der Durchführung zeigte sich bereits, dass nahezu keine Haftkraft zwischen der Folie und dem Wafer nach der Belichtung besteht. Dies wird durch den deutlichen Bogen der Folie während des Abzugs sichtbar. Die Aussagekraft der gemessenen Kräfte ist deshalb fraglich. Die minimale verbleibende Haftkraft bestätigt jedoch die Wirksamkeit der Belichtung.

Die Kraft, welche benötigt wird, um ein Stück eines Wafers senkrecht von der belichteten Folie ADWILL D-841 abzuziehen, wurde ermittelt. Hierbei konnte von den zwei untersuchten Proben mit jeweils sechs quadratischen Stücken eines Siliziumwafers mit einer Kantenlänge von 10 mm abgezogen werden. Hierbei konnte lediglich eine Probe korrekt vermessen werden. Bei der ersten Probe konnten sechs Abrisse durchgeführt werden, wobei sich die gesamte Fläche schlagartig löste. Der Durchschnitt der maximalen Abzugsspannung lag bei $0,06 \text{ MPa} \pm 0,006 \text{ MPa}$. Bei der zweiten Probe zeigte sich bei fünf von sechs Abzügen ein völlig anderes Verhalten. Lediglich bei Abzug 21 konnte ein linearer Anstieg der Kraft und ein sauberer Abriss beobachtet werden. Bei den Abzügen 12 bis 16 schälte sich der

Wafer ausgehend von einer Seite vom Tape ab. Der Durchschnitt der maximalen Abzugsspannung lag deshalb mit $0,025 \text{ MPa} \pm 0,023 \text{ MPa}$ deutlich unter dem Wert der Probe 1. Die Differenz zwischen den Proben entstand durch eine Biegung von Probe 2 während des Aufklebens auf die Probenhalterung. Dies führte zu einer partiellen Ablösung der Wafer entsprechend einer mechanischen Vorbelastung.

Zur Charakterisierung der Kräfte, welche Silikon-Stempel aufbringen können, wurden diese auf Siliziumwafer gedrückt und anschließend davon abgezogen. Bei allen Stempelformen und unabhängig von der Silikonmischung zeigte sich, dass die maximale Abzugskraft beim zweiten und dritten Abziehen kleiner wird. Dies lässt sich durch die Aufnahme von Staubpartikeln von der Oberfläche des Wafers erklären. Es fällt auf, dass jeweils zwei Proben ein nahezu identisches Verhalten aufweisen und eine Probe mit kleineren Abzugskräften davon abweicht. Diese Abweichung entsteht durch den fehleranfälligen Prozess der Stempelanspannung. Bereits ein minimales Kippen des Stempels kann hierbei eine große Auswirkung auf die Abzugskraft haben. Das Mischungsverhältnis des Silikons hat eine deutliche Auswirkung auf die maximale Abzugskraft. Stempel mit einer Silikonmischung von 10:1 hatten eine durchschnittliche maximale Anzugsspannung von $0,026 \text{ MPa} \pm 0,006 \text{ MPa}$, wohingegen die 20:1 Proben eine durchschnittliche maximale Anzugsspannung von $0,043 \text{ MPa} \pm 0,011 \text{ MPa}$ aufwiesen.

Einen großen Einfluss auf die Abzugsspannung hat die Abzugsgeschwindigkeit. Unabhängig von der Stempelform und der Silikonmischung steigt die Abzugskraft mit steigender Abzugsgeschwindigkeit. Die überprüften Abzugsgeschwindigkeiten bis 10 mm/min sind eher langsam. Die Geschwindigkeit wurde hierbei durch die Beschleunigung der Prüfmaschine auf den sehr kurzen Strecken bis zum Abriss begrenzt. Die Geschwindigkeit, mit welcher am Fineplacer gearbeitet wird, lässt sich mit dem vorhandenen Aufbau nicht ermitteln. Sie liegt jedoch über den Geschwindigkeiten der Zugversuche. Für das Umsetzen von Dies am Fineplacer werden deshalb größere Kräfte erwartet.

Der Einfluss der Anpressspannung auf die Abzugsspannung zeigt Abbildung 25. Hierbei zeigt sich, dass bei Stempeln mit einer Silikonmischung von 10:1 ein Einfluss nur bei kleinen Anpressspannungen sichtbar ist. Über einer Anpressspan-

nung von 0,05 MPa kann die Auswirkung vernachlässigt werden. Bei einer Silikonmischung von 20:1 wird über einer Anpressspannung von 0,15 MPa keine signifikante Auswirkung gemessen.

Die durchgeführten Zugversuche zeigen, dass das Abheben von Dies, welche auf der UV-empfindlichen Klebefolie ADWILL D-841 gesägt wurden, möglich ist. Beim schnellen Abziehen liegen die Kräfte, welche die Stempel aufbringen, über der benötigten Abzugskraft der Folie. Das Greifen von Bauteilen durch Vakuum liegt im Vergleich der Kräfte im unteren Bereich. Die theoretisch mögliche Kraft für Aufnahme mit einer Dosiernadel lag hierbei mit der schlechtesten Stempelkombination (harter Stempel bei langsamem Abzug) gleich auf. Für die optimale wirkende Fläche für das Vakuum kann von einer quadratischen Fläche mit 200 µm Länge ausgegangen werden. Hierbei wird angenommen, dass für die Dichtung rundum ein 25 µm breiter Rand benötigt wird. Ein so optimierter Vakuumgreifer könnte mehr Kraft aufbringen, als die langsam bewegten Stempel, erreicht jedoch nicht die Kräfte der schnell bewegten Stempel. Der Vergleich der Kräfte wird in Abbildung 32 dargestellt.

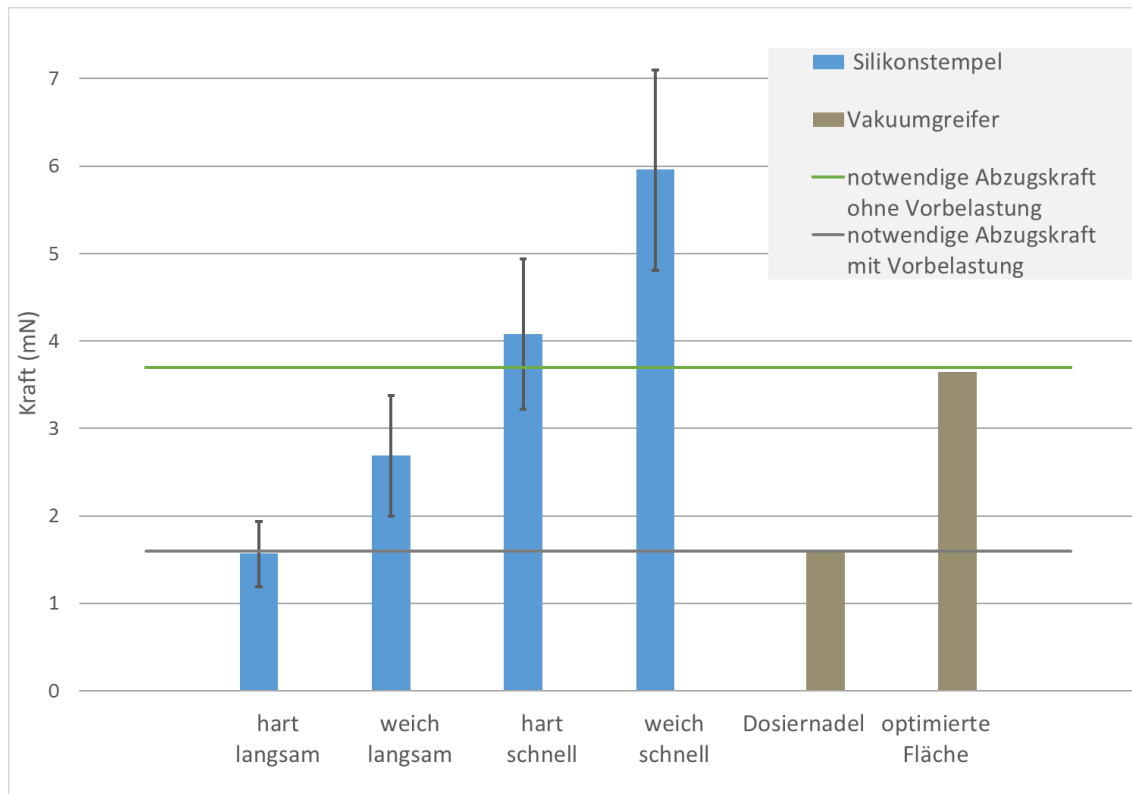


Abbildung 32 Vergleich der Kräfte für den Abzug eines Dies mit 250 μm Kantenlänge. Die Abzugskräfte der Silikonstempel werden mit Mischungsverhältnissen von 10:1 (hart) und 20:1 (weich) sowie mit den Abzugsgeschwindigkeiten 0,6 mm/min (langsam) und 10 mm/min (schnell) dargestellt. Die Kräfte für die Vakuumgreifer wurden für die Aufnahme mit einer Dosiernadel ($l_d = 0,15\text{ mm}$) und einer optimierten quadratischen Kontaktfläche von 0,2 mm x 0,2 mm berechnet.

In den Versuchen am Fineplacer zeigte sich, dass die Herstellung und Vorbehandlung der Probe entscheidet, ob ein Abnehmen möglich ist oder nicht. Bei Proben, welche am selben Tag hergestellt und belichtet wurden, konnten zwischen 0 % und 87 % eines Arrays abgehoben werden. Der Austausch der Stempel hatte auf das Ergebnis hierbei keinen Einfluss. Die vorhandenen Probleme der Reproduzierbarkeit müssen somit durch einen Effekt bei der Probenherstellung oder der Probenvorbereitung hervorgerufen werden. Es sind mehrere Einflussmechanismen möglich, welche weiter untersucht werden müssen. Eine Inhomogenität der verbleibenden Klebekraft der Klebefolie nach der Belichtung ist denkbar. Diese Inhomogenität kann bereits die gekaufte Folie enthalten oder durch die Handhabung und Lagerung hervorgerufen werden. Durch das Sägen können mehrere Einflussfaktoren auftreten. Während des Sägens wirken Kräfte auf den Wafer und die Folie, welche zu einem partiellen Andrücken der Dies oder einem Ablösen der Folie führen können. Die große Menge an Kühlwasser, welches für die Kühlung und Entfernung des Sägestaubs benötigt wird, beeinflusst die Probe. Es ist denkbar,

dass Kühlwasser und Sägestaub durch Kapillareffekte zwischen Dies und Folie eindringen und den späteren Belichtungsprozess oder die Haftung der Folie beeinflussen. Der Staub kann zusätzlich die Oberfläche der Dies verunreinigen und die Stempelhaftung so reduzieren. Ein weiterer Faktor ist die mechanische Vorbelastung nach dem Belichten und das Aufkleben. Bei beiden Prozessen wird die Folie mit den Dies gebogen. Die Vorbelastung wird von Hand mit einer oberen Begrenzung des Winkels durchgeführt. Durch die händische Durchführung kann es zu großen Unterschieden bei der Vorbehandlung der Proben kommen. Um die Folie blasenfrei auf das Glas zur Fixierung aufzubringen, muss die Folie erneut von Hand leicht gebogen werden. Hierbei ist die Biegung nicht definiert.

6 Fazit und Ausblick

Durch Zugversuche konnte grundlegend gezeigt werden, dass das Abheben von Dummy-Dies mit Siliziumoxidoberfläche von der UV-empfindlichen Folie ADWILL D-841 mit PDSM-Stempeln möglich ist. Versuche zeigten, dass mit den beschriebenen Prozessen Dummy-Dies von einer vorbereiteten Probe abgehoben und auf ein Zielsubstrat abgesetzt werden können. Als kritischer Prozess zeigte sich hierbei die Herstellung und Vorbereitung der gesägten Dies. Es muss weiter untersucht werden, welche Einflüsse zu den extremen unterschiedlichen Ergebnissen beim Umsetzen der Dies führen.

Die etablierten Prozesse können weiter zur Herstellung von Grundsubstraten für die Entwicklung von Verfahren zur Einbettung von Dummy-Dies in flexiblen Substraten genutzt werden. Für das Umsetzen der originalen Dies kann das beschriebene Verfahren als Grundlage genutzt werden, um dieses nach der Anpassung des Prozesses anzuwenden. Zu den Anpassungen gehören die Minimierung der Sägespurbreite, die Anpassung der Größe an die Dies und das Umsetzen von Dies mit der originalen Oberfläche. Um eine Überprüfung der Genauigkeit der Umsetzprozesse zu erhalten, muss ein Messverfahren gefunden werden, welches neben den großen Abständen zwischen den Dies, die Position und die Verdrehung exakt ermitteln kann.

7 Literaturangaben

- [1] Bucher, V.: Produktantrag Neuro-Flexarray im Rahmen des Programms „Forschung an Fachhochschulen“, Förderrunde 2014 (2014)
- [2] Heid, A.: Stand NEURO-FLEXARRAY in RT. Projekttreffen NFA. Rottweil 2016
- [3] Risse, A.: Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionstechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg 2012
- [4] reichelt elektronik GmbH & Co. KG: SMD-Bauelemente, Sande 2017. <https://www.reichelt.com/reicheltmedia/index.php5/SMD-Bauelemente>
- [5] EXCEN PRO. http://www.multi-components.de/systeme/bestuecken/excen_pro.php
- [6] Cohn, M. B., Böhringer, K. F., Noworolski, J. M., Singh, A., Keller, C. G., Goldberg, K. Y. u. Howe, R. T.: Microassembly Technologies for MEMS (1998)
- [7] Carlson, A., Bowen, A. M., Huang, Y., Nuzzo, R. G. u. Rogers, J. A.: Transfer printing techniques for materials assembly and micro/nanodevice fabrication. Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.) 24 (2012) 39, S. 5284–5318
- [8] Hesse, S.: Greifertechnik. Effektoren für Roboter und Automaten. München: Carl Hanser Verlag, 2011
- [9] Dosier-Nadeln. <http://www.martin-smt.de/dosieren/verbrauchs-material/dosier-nadeln.html>, abgerufen am: 13.03.2017
- [10] Optimum®-Allzweckspitzen | Edelstahl-Dosiernadeln | Nordson EFD, 2016. <http://www.nordson.com/de-DE/divisions/efd/products/dispense-tips/general-purpose-tips>, abgerufen am: 13.03.2017
- [11] Produkte - Vieweg GmbH Dosier- und Mischtechnik, 2016. http://www.dosieren.de/produkte/cat/dosiernadeln-standard.html?no_cache=1, abgerufen am: 13.03.2017
- [12] Tipler, P. A. u. Gene, M.: Physik. für Wissenschaftler und Ingenieure. Berlin: Springer Spektrum 2015
- [13] Paretkar, D., Kamperman, M., Martina, D., Zhao, J., Creton, C., Lindner, A., Jagota, A., McMeeking, R. u. Arzt, E.: Preload-responsive adhesion: effects of aspect ratio, tip shape and alignment. Journal of the Royal Society, Interface 10 (2013) 83

- [14] Meitl, M. A., Zhu, Z.-T., Kumar, V., Lee, K. J., Feng, X., Huang, Y. Y., Adesida, I., Nuzzo, R. G. u. Rogers, J. A.: Transfer printing by kinetic control of adhesion to an elastomeric stamp. *Nature Materials* 5 (2005) 1, S. 33–38
- [15] Wintermantel, E. u. Ha, S.-W.: *Medizintechnik. Life Science Engineering. Interdisziplinarität, Biokompatibilität, Technologien, Implantate, Diagnostik, Werkstoffe, Zertifizierung, Business.* Berlin u.a.: Springer 2009
- [16] *Chemische Eigenschaften von Siliconelastomeren*, Lambrecht, J., Wolf, H. P. u. Gerlach, E., Wiesbaden
- [17] *Römpp-Chemie-Lexikon. Pl-S.* Stuttgart: Thieme 1992
- [18] Roth, J.: *Funktionalisierung von Silikonoberflächen*, Technischen Universität Dissertation. Dresden 2009
- [19] Völklein, F. u. Zetterer, T.: *Praxiswissen Mikrosystemtechnik. Grundlagen - Technologien - Anwendungen ; mit 55 Tabellen.* Vieweg Praxiswissen. Wiesbaden: Vieweg 2006
- [20] UST ULTRON SYSTEMS. *Sägefolie*, MINITRON elektronik GmbH, Ingolstadt 2011
- [21] Datasheet ADWILL D-841. - UV Curable Dicing Tape for mold Package -, 2014
- [22] Brockmann, W., Geiß, P. L., Klingen, J. u. Schröder, B.: *Klebtechnik. Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren.* Weinheim: Wiley-VCH 2005
- [23] *Betriebsanleitung DELOLUX 03 E. Aushärtungslampen und Zubehör*, DELO Industrie Klebstoffe
- [24] SYLGARD® 184 SILICONE ELASTOMER KIT. <http://www.dowcorning.de/applications/search/default.aspx?R=131DE>, abgerufen am: 09.01.2017
- [25] Sylgard® 184 Silicone Elastomer, Dow Corning Corporation, 2014
- [26] Madsen, M. H., Feidenhans'l, N. A., Hansen, P.-E., Garnæs, J. u. Dirscherl, K.: Accounting for PDMS shrinkage when replicating structures. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 24 (2014) 12
- [27] *Technisches Handbuch. FINEPLACER® Lambda*, Grundgerät, FINETECH GmbH, Berlin 2007

Danksagung

Zuerst möchte ich mich beim Naturwissenschaftlichen und Medizinischen Institut an der Universität Tübingen für das mir entgegengebrachte Vertrauen bedanken. Mein besonderer Dank gilt hierbei der Arbeitsgruppe Mikromedizin- und Oberflächentechnik, welche mich für die Zeit meiner Thesis aufgenommen und unterstützt hat. Des Weiteren danke ich der Arbeitsgruppe Kleb- und Prüftechnik, für die Unterstützung bei den durchgeführten Zugversuchen.

Ich möchte vor allem auch meinen Betreuern, Herrn Prof. Volker Bucher und Herrn Andreas Heid, für die gute Betreuung danken.

Meinen Eltern und meiner Familie danke ich für das Ermöglichen meines Studiums und für die Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung.

Weiter möchte ich meinen Freundinnen Anni und Alisa für die Unterstützung und den moralischen Beistand danken.

Abschließend geht mein Dank an alle, die hier nicht namentlich erwähnt sind, aber trotzdem auf verschiedenen Wegen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.